



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN PARA EL
TRATAMIENTO DE LA CALIZA EN LA OBTENCIÓN DE CAL Y
DERIVADOS DE LA CORPORACIÓN LOS NEVADOS”**

TESIS DE GRADO

**PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR:
LUCÍA ISABELA GONZÁLEZ GAVILÁNEZ
RIOBAMBA – ECUADOR**

2012

AGRADECIMIENTO

“Sólo un exceso es recomendable en el mundo: el exceso de gratitud”.

Jean de La Bruyere

Agradezco:

Infinitamente a Dios por la virtuosa generosidad de la fortaleza espiritual concedida para lograr todas las metas propuestas en mi vida.

A mis queridos padres Raúl y Ana por el apoyo incondicional y la confianza depositada en mí para la realización de este trabajo de investigación.

A mis profesores por impartir sus conocimientos y darme el impulso para enamorarme de la carrera de Ingeniería Química.

Al Ing. César Ávalos e Ing. Aída Granja, por contribuir en el desarrollo y dar las directrices para este proyecto de Tesis.

A la Agencia Crecer por brindarme la oportunidad de desarrollar el presente trabajo y contribuir en mi desarrollo como profesional.

A los miembros de la Corporación Los Nevados por otorgar las facilidades y su colaboración para la evolución de la investigación.

A la Empresa Cemento Chimborazo por su apoyo desinteresado a la formación de los estudiantes de la ESPOCH y a la investigación de proyectos de beneficio social.

Lucía I. González G.

DEDICATORIA

Dedico mi esfuerzo depositado en la culminación de este proyecto de Tesis a:

Mis padres, por ser el pilar fundamental de mi vida y motivo de mi existencia, porque los quiero por lo que son y por lo que han hecho de mí y nada más me gustaría, que se sientan orgullosos, y que compartan mi felicidad de este logro.

Mi hermana, Anita María por ser mi amiga y confidente, quien siempre me brindó alegría en situaciones difíciles y ha compartido conmigo momentos inolvidables.

Mis familiares en especial a mi Tía María Gavilánez por su apoyo así también a mis seres queridos por brindarme su motivación y ánimo durante mi formación estudiantil.

La Escuela Superior Politécnica, por abrirme sus puertas del saber y brindarme la formación académica, personal y conferirme el preciado valor de la amistad con profesores y compañeros.

Lucía I. González G.

NOMBRE

FIRMA

FECHA

Dra. Yolanda Díaz

**DECANA DE LA FACULTAD DE
CIENCIAS**

Ing. Mario Villacrés

**DIRECTOR DE ESCUELA DE
INGENIERÍA QUÍMICA**

Ing. César Ávalos

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Aída Granja

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. Hugo Calderón

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Sr. Carlos Rodríguez

**DIRECTOR DEL CENTRO DE
DOCUMENTACIÓN**

NOTA TESIS ESCRITA: _____

Yo, LUCÍA ISABELA GONZÁLEZ GAVILÁNEZ,
soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados
expuestos en esta Tesis, y el patrimonio intelectual
de la Tesis de Grado pertenece a la “ESCUELA
SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO”.

LUCÍA I. GONZÁLEZ G.

INDICE DE ABREVIATURAS

\dot{Q}	Simbología de flujo de calor
h_f°	Entalpía de formación en el estado de referencia
\dot{m}	Simbología de flujo másico
$^\circ\text{API}$	Unidad de clasificación de calidad del petróleo y derivados según el Instituto Americano de Petróleo.
$^\circ\text{C}, ^\circ\text{K}$	Unidades de temperatura
AC	Relación aire-combustible
Al_2O_3	Óxido de aluminio
BC	Relación Beneficio-Costo
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hidróxido de calcio, cal hidratada o apagada
CaCO_3	Carbonato de calcio o calcita
$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	Dolomita
CaO	Óxido de calcio o cal viva
COVs	Compuestos Orgánicos Volátiles
cSt	Centistokes, unidad de viscosidad
Fe_2O_3	Óxido de hierro
g/cm^3	Unidades de densidad
K_2O	Óxido de potasio

Kcal/h	Unidad de flujo de calor
Kcal/Kg	Unidades de poder calorífico
Kcal/Kg °C	Unidades de calor específico
Kcal/mol	Unidad de entalpía de formación
Kg	Kilogramo, unidad de masa
Kg/h	Unidad de flujo másico
m ³	Metro cúbico, unidad de volumen
mg/Nm ³	Unidad de emisión de gases de combustión a condiciones normales de presión y temperatura.
MgCO ₃	Magnesita
MgO	Óxido de magnesio
Mohs	Rango de dureza según la escala de Mohs
MP	Material Particulado
η	Simbología de Eficiencia
Na ₂ O	Óxido de sodio
PPC	Perdidas por calcinación
ppm	Partes por millón, unidad de concentración.
SiO ₂	Óxido de silicio
SO ₃	Trióxido de Azufre
TULAS	Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria
ρ	Densidad

Índice de Contenido

PORTADA.....	1
AGRADECIMIENTO.....	2
DEDICATORIA	3
INDICE DE ABREVIATURAS.....	6
ÍNDICE DE CONTENIDO	7
RESUMEN	18
SUMMARY.....	19
INTRODUCCIÓN	20
ANTECEDENTES.....	22
JUSTIFICACIÓN	24
OBJETIVOS	25

CAPÍTULO I

1 MARCO TEÓRICO	27
1.1 Generalidades	27
1.1.1 Especificación de la Materia prima.....	27
1.1.1.1 Piedra Caliza	27
1.1.1.2 Procesos de Obtención de CaCO_3	28
1.1.1.3 Principales Características de las calizas.....	28
1.1.1.4 Clasificación	29
1.2 La cal y sus derivados	32
1.2.1 Cal	32
1.2.2 Cal apagada	35

1.3 Aplicaciones de la cal	35
1.4 Producción de cal viva	39
1.4.1 Procesos de obtención de cal	39
1.4.2 Horno para la producción de Cal	42
1.4.2.1 Principales componentes del Horno	42
1.4.2.2 Horno de columna	43
1.4.3 Factores que afectan la calidad del CaO industrial	45
1.4.3.1 Composición química de la caliza, CaCO_3 más impurezas	45
1.4.3.2 Tamaño de Piedra Caliza	45
1.4.3.3 Temperatura del horno	47
1.4.3.4 Tiempo de residencia.....	48
1.4.3.5 Atmósfera del horno	48
1.5 Combustión	48
1.5.1 Fases de la reacción de combustión	49
1.5.2 Clases de reacciones de combustión	49
1.5.2.1 Combustión neutra	49
1.5.2.2 Combustión incompleta.....	50
1.5.2.3 Combustión completa.....	50
1.5.2.4 Procesos de combustión teórico y real	51
1.5.2.5 Principales componentes del sistema de combustión.....	52
1.6 Combustible	54
1.6.1 Tipos de combustibles	55
1.6.1.1 Combustibles sólidos.....	55
1.6.1.2 Combustibles gaseosos.....	55

1.6.1.3 Combustibles líquidos	56
1.7 Productos de la combustión	58
1.7.1 Formación de SO _x	58
1.7.2 Formación de NO _x	58
1.7.3 Formación de CO	58
1.7.4 Dióxido de carbono (CO ₂).....	59
1.7.5 Valor de agua (H ₂ O).....	59
1.7.6 Oxígeno	59
1.7.7 Compuestos orgánicos volátiles (COVs).....	59
1.7.8 Metales pesados.	59
1.7.9 Dibenzo-p-dioxinas y dibenzofuranos policlorados (PCDD/PCDFs).....	60
1.7.10 Partículas sólidas.....	60
1.8 Aceites usados como combustible alternativo	61
1.8.1 Composición de Aceites Usados	61
1.8.2 Distintas posibilidades y reusos	63
1.8.3 Efectos ambientales de los residuos de combustión de aceites usados	64
1.8.3.1 Contaminación del aire	64
1.8.3.2 Riesgos a la salud	65
1.8.4 Estudio del aceite usado como combustible	65
1.8.5 La regeneración.....	65
1.8.5.1 Tecnologías de regeneración.....	65
1.8.6 La valorización energética.....	66
1.8.6.1 Pretratamiento de los aceites usados	67

CAPÍTULO II

2 PARTE EXPERIMENTAL	70
2.1 MUESTREO	70
2.1.1 Muestreo de Piedra Caliza	71
2.1.2 Muestreo de Cal Viva	71
2.1.3 Muestreo del Combustible: Aceite quemado (residual de automotores)	72
2.2 METODOLOGIA DE TRABAJO	73
2.2.1 MÉTODOS Y TÉCNICAS	73
2.2.1.1 MÉTODOS	74
2.2.1.2 TÉCNICAS	76
2.2.1.2.1 Técnicas para la determinación de parámetros físico químicos de la piedra caliza y de la cal	76
2.2.1.2.2 Técnicas para la determinación de parámetros físico químicos del combustible: aceite lubricante residual de motores	83
2.3 DATOS EXPERIMENTALES	86
2.3.1 DATOS	86
2.3.1.1 Análisis químico de la piedra caliza como materia prima y de la cal viva como producto de calcinación.	86
2.3.1.2 Análisis físico de la piedra caliza como materia prima y de la cal viva como producto de calcinación	87
2.3.1.3 Caracterización del aceite lubricante usado utilizado como combustible para el horno de cal.	88
2.4 DATOS ADICIONALES	89
2.4.1 Caracterización del aceite quemado	89
2.4.2 Análisis de gases de combustión	90

2.5 DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN	94
2.5.1.1 Diagnóstico de las etapas de operación productiva.....	94
2.5.1.2 Diagnóstico de la materia prima de producción.....	97
2.5.1.3 Diagnóstico de los gases de combustión	97
2.5.1.4 Análisis Económico.....	98

CAPÍTULO III

3 OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN	102
3.1 CÁLCULOS.....	102
3.1.1 Balances de masa y energía en el horno vertical	102
3.1.1.1 Balance de masa	102
3.1.1.1.1 Capacidad de producción de cal viva diaria	103
3.1.1.2 Balance de energía	104
3.1.1.2.1 Cálculo de Calor útil necesario para la disociación de CaCO_3	105
3.1.1.2.2 Determinación del flujo de calor aportado por el combustible para el proceso de calcinación de la piedra caliza en el horno.....	106
3.1.1.3 Determinación del exceso de aire en la reacción de combustión	109
3.1.1.4 Determinación de las pérdidas de calor	113
3.1.1.5 Cálculo de la eficiencia del actual proceso de Combustión.....	115
3.1.1.6 Cálculo de la eficiencia del proceso de Combustión mejorado.....	116
3.2 RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS.....	117
3.3 PROPUESTA	118
3.4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	123

CAPÍTULO IV

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	127
4.1 CONCLUSIONES	127
4.2 RECOMENDACIONES	128
BIBLIOGRAFÍA.....	130
ANEXOS	134
FOTOGRAFÍAS	142
Planta de Cal- Caleras del Pacífico	142
Sistema de Combustión	143
Parte experimental.....	144
Análisis de Gases	147

Índice de Tablas

Tabla N° 1 Características básicas de principales calizas	29
Tabla N° 2 Valores de equilibrio para la presión del dióxido de carbono a diversas temperaturas.....	32
Tabla N° 3 Características físico-químicas de los distintos tipos de cal viva	33
Tabla N° 4 Características Físico-químicas de las cales producidas por INACESA.....	34
Tabla N° 5 Consideraciones Teóricas para la eficiencia de combustión del fuel oil	44
Tabla N° 6 Composición de contaminantes presentes en los aceites residuales	62
Tabla N° 7 Características fisicoquímicas de los aceites usados	62
Tabla N° 8 Concentración de contaminantes durante el tratamiento de aceite usado	68
Tabla N° 9 Descripción de los métodos empleados en función del objetivo de análisis	74
Tabla N° 10 Análisis químico de materia prima y producto.	86

Tabla N° 11 Determinación Granulométrica de Cal Viva.....	87
Tabla N° 12 Densidad de caliza y cal viva	88
Tabla N° 13 Caracterización del aceite lubricante usado	88
Tabla N° 14 Caracterización de contaminantes del aceite quemado	89
Tabla N° 15 Parámetros fisicoquímicos del aceite quemado	90
Tabla N° 16 Análisis In Situ de gases de combustión.....	90
Tabla N° 17 Primer análisis de gases de Combustión.....	91
Tabla N° 18 Segundo análisis de gases de Combustión.....	92
Tabla N° 19 Detalle general de los factores económicos implicados en la producción y venta de cal viva e hidratada.....	98
Tabla N° 20 Detalle del costo de adquisición del combustible	99
Tabla N° 21 Costos totales de Producción y de Ventas, Valores de ganancia mensual y anual	100
Tabla N° 22 Pesos moleculares de los compuestos químicos de la reacción de calcinación de la caliza	103
Tabla N° 23 Entalpías de Formación de los compuestos químicos de la reacción de calcinación de la caliza	105
Tabla N° 24 Resultados de Cálculos de Ingeniería.....	117
Tabla N° 25 Descripción de las alternativas de solución para cada área que involucra la optimización del proceso de combustión.....	120

Índice de Figuras

Figura N°1	Calcinación de caliza.....	31
Figura N°2	Diagrama de flujo del tratamiento de la piedra caliza.....	41
Figura N°3	Representación gráfica de un horno de columna	44
Figura N°4	Piedras calizas, de diferente tamaño y geometría, sometidas a calcinación...	46
Figura N°5	Balance de Masa	102
Figura N°6	Flujos de Calor en el horno.....	104
Figura N°7	Esquematzación de la propuesta para la optimización del actual proceso de combustión.....	119

Índice de Anexos

ANEXO A	Composición química de la cal viva.....	134
ANEXO B	Límites máximos permisibles de emisiones al aire para fuentes fijas de combustión.....	134
ANEXO C	Límites máximos permisibles para emisiones Gaseosas de incineradores de desechos peligrosos.....	135
ANEXO D	Niveles máximos permisibles de emisiones a la atmósfera.....	136
ANEXO E	Vista planta del actual sistema de combustión para la calcinación de la piedra caliza.....	137
ANEXO F	Modelo de Diseño de Horno Vertical para la Producción de Cal.....	138
ANEXO G	Informe de resultados del análisis del aceite quemado.....	139
ANEXO H	Certificado de la Empresa Cemento Chimborazo.....	140
ANEXO I	Certificado de la Agencia Crecer.....	141

Índice de Fotografías

Foto N° 1 Rótulo de la planta de cal.....	142
Foto N° 2 Recepción de piedra caliza.....	142
Foto N° 3 Pilas de piedra caliza.....	142
Foto N° 4 Reducción de tamaño de piedra caliza	142
Foto N° 5 Transporte de piedra caliza al horno.....	142
Foto N° 6 Alimentación de piedra caliza.....	142
Foto N° 7 Interior de un horno vertical.....	143
Foto N° 8 Almacenamiento de combustible.....	143
Foto N° 9 Tanque de suministro de combustible.....	143
Foto N° 10 Ventilador y quemador.....	143
Foto N° 11 Descarga de cal viva.....	143
Foto N° 12 Enfriamiento y acopio de piedra calcinada.....	143
Foto N° 13 Muestra de piedra caliza	144
Foto N° 14 Muestra de cal viva	144
Foto N° 15 Medición de temperatura	144
Foto N° 16 Termocupla.....	144
Foto N° 17 Trituradora mandíbula MSI	144
Foto N° 18 Pulverizador BICO.....	145
Foto N° 19 Plato Caliente Thermo Scientific Type 2200.....	145
Foto N° 20 Prensa HERZOG.....	145
Foto N° 21 Espectrómetro de rayos X.....	145
Foto N° 22 Titulación para determinar CaCO_3 totales.....	145
Foto N° 23 Determinación de Sílice	146
Foto N° 24 Análisis Complexométrico	146
Foto N° 25 Equipo de tamizado	146
Foto N° 26 Determinación de densidad.....	146

Foto N° 27 Medición de gases en la chimenea	147
Foto N° 28 Medición de gases en el ciclón	147
Foto N° 29 Tren isocinético	147
Foto N° 30 Analizador de gases.....	147

RESUMEN

La optimización del proceso de combustión para el tratamiento de la caliza en la obtención de cal y derivados de la Corporación Los Nevados, situada en la provincia de Chimborazo, cantón Riobamba, en sus parroquias rurales Calpi, Licán y San Juan, promete un beneficio operativo-productivo.

Se aplicó la metodología exploratoria y evaluativa en la unidad representativa de estudio, Caleras del Pacífico.

La materia prima y producto fueron analizados, mediante técnicas y materiales estandarizados, en el laboratorio de control de calidad de la Empresa Cemento Chimborazo. Se investigó también las características fisicoquímicas del aceite quemado y emisiones de combustión. Y las variables del proceso: temperatura de calcinación, flujo de combustible, y piedra caliza, fueron determinadas con instrumentos como pirómetro, flexómetro, cronómetro, y balanza, para calcular la eficiencia del sistema.

Resultando que la pureza de caliza empleada $<95\%$, influye en la calidad de cal viva y rendimiento productivo del $46,34\%$. El suministro de calor es deficiente, el producto contenía CO_2 y $\text{H}_2\text{O} >3\%$, indicando la presencia de CaCO_3 sin calcinar.

El plomo ($>0,8\text{mg/m}^3$) y material particulado ($>80\text{mg/m}^3$), son los principales contaminantes por su inconformidad con el acuerdo 048 del MA, concerniente a la industria cementera. Y la eficiencia de combustión del $34,67\%$, refleja pérdidas de calor, que deben ser remediadas.

La optimización consistió en la propuesta de alternativas de solución, enfocadas a la mejora de las áreas de calidad, ambiental y operacional, con la implementación de equipos y sensores de control, propiciando un aumento de eficiencia ($78,44\%$).

Se recomienda además, utilizar una caliza de $\text{CaCO}_3 >95\%$, regular el flujo de combustible y aire para el control de temperatura de calcinación (máx. 1250°C), adecuaciones del horno y monitoreo de las emisiones de combustión.

SUMMARY

Optimization of the combustion process for the treatment of limestone in the obtaining of lime and its derivatives of the Corporation "Los Nevados", located in the Chimborazo province, Riobamba canton, in its rural parishes: Calpi, Licán and San Juan, promises an operative-productive benefit. The objectives of this Thesis are: a) Characterize the limestone and quicklime to determine its quality characteristics, b) Determine the main pollutants through the investigation of the combustion gases, and c) Do engineering calculations to determine the efficiency of the process and evaluate the results.

The exploratory and evaluative methodology was applied in the representative unit of study, "Caleras del Pacífico". The raw material and product were analyzed, through techniques and standardized materials, in the laboratory of quality control of the Company "Cemento Chimborazo". The physical-chemical characteristics of burned oil and combustion emissions were also investigated. And the variables of the process: calcination temperature, fuel flow, and limestone, were determined with instruments like pyrometer, flexometer, chronometer and balance to calculate the efficiency of the system.

The result was that the purity of limestone used $<95\%$, influenced in the quality of quicklime and productive performance of 46.34% . The heat supply was deficient, the product contained CO_2 and $\text{H}_2\text{O} >3\%$ indicating the presence of CaCO_3 without calcining. The lead ($>0,8\text{mg/m}^3$) and particulated material ($>80\text{mg/m}^3$), were the main polluting agents by their nonconformity with the agreement 048 of the MA, concerning the cement industry. And the efficiency of combustion $34,67\%$, reflects loss of heat that must be remedied.

The optimization consisted on the proposal of solution alternatives, focused to the improvement of the quality, environmental and operational areas, with the implementation of equipment and sensors of control, favoring an increase of efficiency (78.44%). It is recommended to use a limestone of $\text{CaCO}_3 > 95\%$, regulate the fuel and air flow to control the calcination temperature (max. 1250°C), adapt the oven and monitor the combustion emissions.

INTRODUCCIÓN ^[1]

La cal es el más ancestral y al mismo tiempo el más actual de los productos químicos de origen natural conocidos y utilizados por el hombre en todo el mundo.

La cal tiene muy diversas aplicaciones, por ejemplo, como fundente en el proceso de refinado del acero, como aglomerante en la construcción, y como agente precipitador de impurezas en los sistemas de tratamiento de aguas. También se utiliza mucho para neutralizar los componentes ácidos de los vertidos industriales y de los gases de combustión. La producción anual de la Unión Europea asciende a 20.000.000 toneladas de cal, lo que equivale al 15% de la producción mundial de relevancia comercial.

El proceso de fabricación consiste en calcinar carbonatos de calcio o magnesio en un horno para liberar dióxido de carbono y obtener óxido de calcio ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$). Por regla general, el producto del horno es machacado, triturado y tamizado antes de ser transportado al silo de almacenamiento, desde donde se envía al usuario final para su aplicación en forma de cal viva o pasa a una planta de hidratación, donde se mezcla con agua para obtener cal apagada. El término “cal” hace referencia tanto a la cal viva como a la cal apagada y es sinónimo del término “derivados de la cal”. La cal viva, o calcinada, es óxido de calcio (CaO). La cal apagada se compone principalmente de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) y el término hace referencia tanto a la cal hidratada (hidróxido de calcio seco en polvo) como a la lechada de cal y al mastique de cal (dispersiones de partículas de hidróxido de calcio en agua).

En la producción suelen utilizarse entre 1.400 y 2.200 kg de caliza por tonelada de cal viva comercial. El consumo depende del tipo de producto, de la pureza de la caliza, del grado de calcinación y de la cantidad de productos residuales. La mayor parte de la materia restante se pierde en el proceso en forma de emisiones atmosféricas de dióxido de carbono.

Por otro lado desde la perspectiva ambiental, en la actualidad existe una preocupación generalizada por los efectos causados sobre el medio ambiente en los procesos y operaciones relacionadas con los requerimientos energéticos de las industrias. La emisión de agentes contaminantes a la atmósfera se ha convertido en uno de los temas ambientales

[1] Industria de Fabricación de Cal

http://circa.europa.eu/Public/irc/env/ippc_brefs/library?l=/cement_languages/cement_lime_espdf

prioritarios a nivel mundial debido al elevado consumo de combustibles y la afectación que este ha tenido sobre los ecosistemas mundiales.

El dióxido de carbono proveniente de la combustión de productos derivados del petróleo es la mayor fuente de emisiones generadoras del efecto de invernadero y por ende del cambio climático global, y se le atribuye el 75 % de dichas emisiones.

Los países desarrollados tienen mayor intensidad en el consumo de combustibles y por ende en la contaminación atmosférica, llegando a tenerse una utilización per cápita de 6,4 toneladas de equivalente de petróleo por año, lo cual equivale a diez veces más que el consumo de combustible en los países en desarrollo.

Por otro lado es importante tener presente que en el sector de fabricación de cal y sus derivados tienen un gran consumo de energía, que representa hasta el 50% de los costes totales de la producción. Los hornos se alimentan de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos. El consumo de gas natural ha registrado un notable aumento durante los últimos años.

En 1995, los combustibles para esta industria a nivel mundial eran el gas natural (48%) y distintos tipos de carbón, como la antracita, el coque, lignito y el coque de petróleo (36%) seguidos del petróleo (15%) y otros combustibles (1%). Los principales problemas medioambientales relacionados con la producción de cal son la contaminación atmosférica y el consumo de energía. El proceso de calcinación es la principal fuente de emisiones y también el principal consumidor de energía. Las principales emisiones son de polvo, óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2) y monóxido de carbono (CO).

Muchas fábricas de cal han adoptado medidas primarias generales, como la optimización del control de procesos especialmente para reducir su impacto ambiental mediante la implementación de procesos de combustión amigables con el medioambiente y que generen un beneficio económico y operativo para la industria.

ANTECEDENTES

La Corporación de productores de cal “Los Nevados”, es una organización asociativa con más de 6 años de vida jurídica, nace en Noviembre del 2005 con la participación de 8 socios y ha crecido éstos últimos años hasta 20 productores de cal y sus derivados en la provincia de Chimborazo en el cantón Riobamba en sus parroquias Rurales Calpi, Licán y San Juan.

Los miembros de la Corporación “Los Nevados” de la provincia de Chimborazo, buscan acceder a recursos de capacitación, técnicos y financieros para mejorar las condiciones de producción, mejorar la calidad de sus productos, obtención de nuevos productos, mejorar las condiciones de comercialización, acceder a nuevos mercados, obtención de certificaciones ambientales y otro tipo de beneficios comunes y organizacionales a través de los cuales pueden acceder a recursos, sean estos del estado y de otras fuentes de financiamiento.

En conjunto abarcan el 30% de la producción de cal y sus derivados para el mercado nacional, sin embargo no lo hacen de manera directa, sino a través de intermediarios que igualmente los venden a otras empresas a precios mucho mayores, perjudicando los beneficios económicos de los productores que al ser presa de los intermediarios no ven una mayor y mejor rentabilidad en sus actividades productivas. Por esta razón surge la necesidad de la implementación de una planta productora de derivados de cal, logrando un beneficio productivo y económico para la corporación.

Por otro lado enfocando al tema de interés, es importante mencionar que en la actualidad el proceso de combustión para el tratamiento de caliza en la obtención de cal de la Corporación “Los Nevados”, es realizado mediante el empleo de dos tipos de combustible, el primero es de origen natural, leña, y el segundo combustible aplicado es de tipo artificial que es al momento aceite quemado (residual del aceite lubricante para motores).

En los últimos años se ha ido incrementado y fortaleciendo la producción de cal viva mediante el empleo de aceite quemado debido a que la tala del bosque primario de las

zonas aledañas resulta un problema medioambiental que debe ser detenido para evitar el aumento de este impacto negativo en el equilibrio ecológico.

Por otro lado el aceite lubricante residual, es aprovechado por este sector, por su alto valor calórico y evitando que éste residuo peligroso sea un contaminante perjudicial para el medio ambiente, sin embargo, a pesar de que este combustible realiza un importante papel en la combustión para el proceso de calcinación de la piedra caliza, ha sido cuestionado su empleo en vista de que contiene contaminantes que durante la quema del combustible son emitidos a la atmósfera. Esto resulta una preocupación primordial para los Productores de Cal ya que su interés a más de producir una cal de calidad es realizar su proceso productivo con una actuación ambiental sostenible.

JUSTIFICACIÓN

El actual proceso de combustión para el tratamiento de la piedra caliza en la obtención de cal implica una preocupación para la Corporación “Los Nevados”, en cuanto, a las deficiencias de cada uno de los componentes del sistema de quema, que provocan o que afectan a la calidad del producto, al medio ambiente y en conjunto a estas pequeñas empresas.

Por otro lado a pesar de que existen dos tipos de combustibles utilizados para la calcinación de la piedra caliza, siendo la madera y el aceite quemado residual de lubricantes de automotores, el presente trabajo se enfoca a este último, en razón de que desde el punto de vista económico-productivo, presenta mayor facilidad de operación y rendimiento frente al otro, sin embargo, el principal problema, es la contaminación ambiental, debido a la presencia de agentes contaminantes en este combustible líquido.

De lo anteriormente mencionado y ante la necesidad de mantener un equilibrio sostenible de la industria en relación al medio ambiente además del compromiso de ofertar un producto de calidad, la investigación propuesta desarrolló, mediante la aplicación de la teoría y de los conceptos básicos así como también mediante cálculos de ingeniería, las posibles medidas operativas para mejorar el rendimiento del proceso de combustión y controlar los residuos de la quema de dicho combustible, para el tratamiento de la piedra caliza y de esta forma contribuir en un futuro inmediato en la implementación de la planta de producción de cal y sus derivados “LOS NEVADOS” de la provincia de Chimborazo.

Por tal circunstancia, y existiendo la posibilidad de que el estado ecuatoriano a través del ministerio de la producción apoya al crecimiento productivo con el proyecto FONDEPYME, y mediante la asesoría de la Agencia Crecer, la Corporación presentó la propuesta de implementación de una planta procesadora de derivados del óxido de calcio, en la cual se mejoren los procesos productivos, por lo que se requiere de manera principal la optimización del proceso de combustión para el tratamiento la piedra caliza.

Es un proyecto que potenciará y mejorará de manera importante los procesos de producción artesanal y nociva para el medioambiente, minimizando de manera sostenible el impacto sobre el mismo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Optimizar el proceso de combustión para el tratamiento de la piedra caliza en la obtención de cal y sus derivados, mediante el manejo de fuentes de información primaria y secundaria, así como también, cálculos de ingeniería, con el propósito de mejorar la eficiencia del proceso, calidad del producto, y control de los gases de combustión.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ◆ Caracterizar la piedra caliza para determinar la calidad de la materia prima.
- ◆ Analizar los valores de las emisiones de los productos de combustión en el proceso de calcinación de la piedra caliza, con el objeto de determinar si existe o no un impacto ambiental y poder tomar medidas de control operacional, para la disminución de sus emisiones.
- ◆ Realizar cálculos de ingeniería, aplicados al proceso de combustión, con la finalidad de determinar la eficiencia de este proceso y evaluar los resultados.
- ◆ Caracterizar la cal viva obtenida con el objeto de determinar la calidad del producto final.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO I

1 MARCO TEÓRICO

Con la perspectiva de lograr una mejor productividad y con la visión futura de implementar una planta productora de derivados de cal, la Corporación Los Nevados, tiene el interés de optimizar el actual proceso de combustión para así producir una cal viva con óptimas características, mejorando y facilitando su operación de proceso.

Es así que el enfoque teórico en función del objeto investigativo, es la descripción y estudio de los aspectos generales involucrados en el proceso de combustión para el tratamiento de la piedra caliza, y de esta manera poder alcanzar su optimización y otorgar un beneficio operativo y ambiental para una planta productora de cal y derivados. A continuación se definen los diferentes conceptos generales involucrados en la investigación.

1.1 Generalidades

1.1.1 Especificación de la Materia prima

1.1.1.1 Piedra Caliza

La **caliza** es una roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio (CaCO_3), generalmente calcita. También puede contener pequeñas cantidades de minerales como arcilla, hematita, siderita, cuarzo, etc., que modifican (a veces sensiblemente) el color y el grado de coherencia de la roca. Es la materia prima con la cual se prepara la cal viva. Para obtener ésta, se calcina la piedra caliza, con lo cual el CaCO_3 que contiene, se transforma en CaO , desprendiendo CO_2 .^[2]



[2] Cales, Compuestos de Calcio

<http://www.textoscientificos.com/quimica/cales>

1.1.1.2 Procesos de Obtención de CaCO_3

El carbonato en las calizas aparece en rocas sedimentarias en forma de calcita, magnesita o dolomita mineral, desde donde se produce por distintos tipos de procesos.

- **Procesos químicos**

En este proceso, el carbonato se obtiene por precipitación de una solución bajo condiciones adecuadas de concentración, presión y temperatura.

- **Procesos biológicos**

Se obtiene a través de organismos vegetales o animales que contienen algunas células que son capaces de absorber carbonato de una solución, concentrarlo y posteriormente depositarlo en forma de esqueleto o concha. Esto normalmente es carbonato de calcio.

- **Procesos clásticos**

Este proceso de obtención, es por destrucción física de sedimentos calizos formados mediante procesos químicos o biológicos y que fueron redepositados en algún lugar, ya sea por congelamiento, deshielo, erosión u otro. Una vez producidos o depositados por los procesos indicados, han estado sujetos a cambios: primero se acomodaron, luego se comprimieron y compactaron bajo presión y que al ser expuestos a altas temperaturas produjo cambios en la estructura de los depósitos, ocurrió recristalización y resultó una gama de depósitos calizos. ^[3]

1.1.1.3 Principales Características de las calizas

Mineralógicamente, los carbonatos útiles para la fabricación de los distintos tipos de cal son: la dolomita, la aragonita y la calcita. Siendo la aragonita, relativamente escasa, ya que es la obtenida por precipitación en caliente en un proceso químico.

[3] La Cal: ¡Es un Reactivo Químico!

Tabla N° 1 Características básicas de principales calizas

Nombre Mineralógico	Fórmula Química	Peso Molecular	Peso específico	Dureza	Forma de los Cristales
		(g/mol)	(g/cc)	(escala de Mohs)	
DOLOMITA	CaCO₃·MgCO₃	184,4	2,84	3,5 - 4,0	Romboédrica
ARAGONITA	CaCO₃	100,1	2,94	3,5 - 4,0	Ortorrómbica
CALCITA	CaCO₃	100,1	2,72	3,0	Romboédrica
MAGNESITA	MgCO₃	84,3	3,00	3,5 - 4,5	Romboédrica

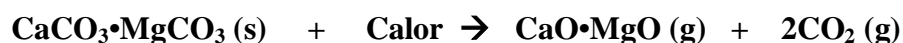
Fuente: National Lime Association

1.1.1.4 Clasificación

De acuerdo al compuesto mineralógico, utilizado para la fabricación del óxido metálico (cal viva), esta adquiere su denominación, pudiendo ser:

- **Dolomita**

Es el carbonato doble de calcio-magnesio, el que al calcinarlo se descompone en óxido de calcio-magnesio (CaO•MgO), de acuerdo a la siguiente reacción química:



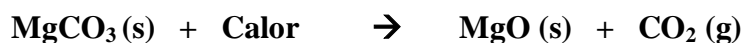
Dolomita

Cal viva dolomítica

La que usualmente contiene entre un 35% a 40% de MgO.

- **Magnesita**

Es el carbonato de magnesio, que al ser sometido a calcinación se disocia en óxido de magnesio, de acuerdo a lo siguiente:



Magnesita

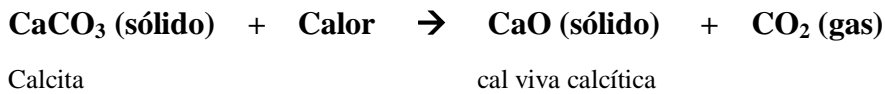
cal viva magnesiana,

magnesia o periclase

Producto con una solubilidad de $6,8 \times 10^{-3}$ g/l a 0°C y de 3×10^{-3} g/l a 100°C.

- **Calcita**

Es el carbonato de calcio, que al calcinarlo se descompone en óxido de calcio (CaO) y anhídrido carbónico, de acuerdo a la siguiente reacción química:

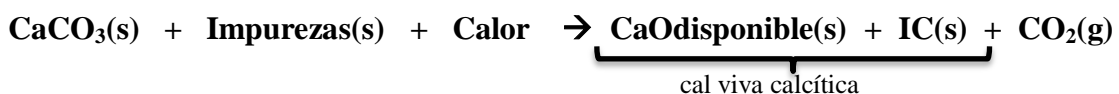


El contenido de MgO fluctúa entre 0,5% a 2,5%. Si éste carbonato contiene cantidades sustanciales de sílice, alúmina, hierro, se obtiene la cal viva hidráulica.

De acuerdo al grado de calcinación y a los fundentes que contenga la materia prima, se obtiene la cal viva calcítica de alta, mediana o baja reactividad, siendo ésta reactividad la medida del tiempo de residencia que necesita la cal en el proceso de hidratación.

En forma vulgar la descarbonatación significa que cuando el calor llega al mineral de carbonato de calcio, éste inicia su descomposición y comienza a generarse el óxido de calcio y en la superficie se desarrollan las reacciones que forman el requemado de éste último, produciéndose el óxido de calcio combinado.

Por lo tanto, el grado de calcinación va a depender de varios factores, entre otros, tamaño granulométrico de la materia prima o heterogeneidad física, cantidad de calor absorbido por cada partícula para lograr la disociación, las impurezas que se enlazan al calcio, tipo de horno utilizado, etc., entonces en la reacción química para lograr la disociación en un proceso industrial, debemos tener presente que en la explotación industrial de calizas, es imposible obtener partículas geoméricamente homogéneas, mono tamaños o mono granulares; por lo general se producen partículas de diferentes tamaños, y con distinta forma. Por otro lado, la tecnología permite una calcinación adecuada cuando la relación entre el tamaño mayor y el menor es 1:3. En el horno, el calor generalmente no es constante, por lo que la disociación del CaO y el CO₂ es diferente, para las partículas grandes y las pequeñas. Si a ello, le agregamos que las calizas vienen con impurezas asociadas, la reacción química industrial es la siguiente:



Donde:

El CaO, disponible(s) o total, está conformado por el CaO útil + CaO requemado + CaO crudo y por el IC(s) que corresponde a las impurezas concentradas.

El CaO útil, corresponde al CaO libre generado durante la calcinación y cuyo pH natural es 12,6. Generalmente se encuentra entre la capa superficial de la partícula, que corresponde al material requemado por sobreexposición al calor y el núcleo de ésta, que es donde queda el material crudo, sin calcinar.

El CaO requemado, se encuentra en la superficie de la partícula, es el CaO que se ha combinado, por exceso de calor, durante la calcinación, con la sílice, la alumina o el hierro contenido en las calizas y cuyo pH natural es entre 12,6 a 12,8 o más. Generalmente corresponde a la parte exterior de las partículas grandes y a la totalidad de las partículas pequeñas. Según literatura de la química del cemento, se refiere a la formación de silicatos y aluminatos cálcicos.

El CaO crudo corresponderá al CaCO_3 , expresado como CaO, que no logra la disociación durante la calcinación, por falta de calor. En general éste corresponde al centro de las partículas más grande, y cuyo pH natural es el mismo de la caliza 8,2.

Esquemáticamente, el proceso industrial de la calcinación de las calizas se podría representar como se indica en la figura para el caso de tres partículas de distinto tamaño:

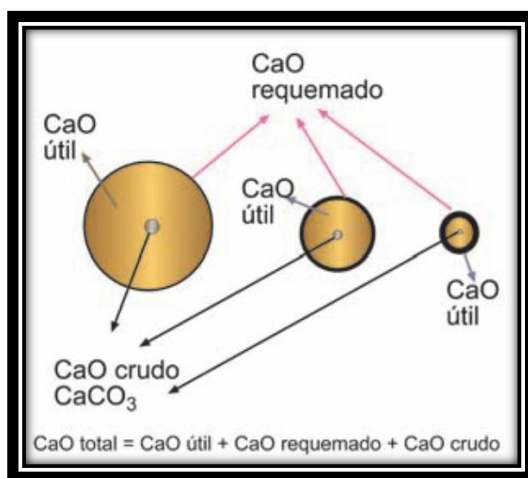


Figura N° 1 Calcinación de caliza

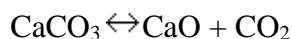
El contenido de impurezas en los distintos tipos de cal, va a depender de las que se encuentren en la materia prima, entre las más comunes están principalmente: el silicio, el aluminio, el hierro, el azufre, el magnesio y los metales alcalinos, entre otras ^[4].

1.2 LA CAL Y SUS DERIVADOS

La cal viva es caliza calcinada, formada principalmente por óxido de calcio u óxido de calcio enlazado con óxido de magnesio y que es capaz de hidratarse con agua y formar productos derivados.

1.2.1 Cal

Se forma óxido de calcio cuando el carbonato de calcio se quema en el aire. En gran escala se produce calentando caliza en grandes hornos de cal llamados también *caleras*:



La reacción es reversible, como indica la ecuación anterior. Se alcanza el equilibrio cuando en contacto con la caliza y la cal existe una determinada concentración o presión parcial de CO_2 . La presión de equilibrio se llama **presión de descomposición** del carbonato de calcio. Si a cualquier temperatura la presión parcial del CO_2 es inferior a la del equilibrio, se descompondrá la caliza para incrementar dicha presión al valor de equilibrio. En cambio, si la presión parcial es superior a la del equilibrio, la cal se combinará con el dióxido de carbono para formar el carbonato, y la presión descenderá al valor del equilibrio.

Tabla N° 2 Valores de equilibrio para la presión del dióxido de carbono a diversas temperaturas

Temperatura en °C.	500	600	700	800	900	1000
Presión (mm. de Hg) .	0,11	2,35	25,3	168	773	2710

Fuente: National Lime Association, Chemical Lime Facts

[4] La Cal: ¡Es un Reactivo Químico!

En la fabricación de la cal, la presión parcial del dióxido de carbono se mantiene inferior a la del equilibrio insuflando a través del horno una corriente de aire que arrastra el CO₂ y mantiene una atmósfera pobre en este gas. En torno a la base del horno se disponen hogares, para someter toda la carga de caliza al calor de los productos de combustión; pero sin ponerse en contacto con el combustible ardiendo. Se evita elevar mucho la temperatura en el horno para que la arena de la caliza no se combine con la cal, formando escoria. La cal producida a temperatura excesiva se llama *cal muerta* (cal quemada) y se apaga muy lentamente.

La cal se usa para preparar cementos y morteros, en la fabricación de polvos de gas; en la industria del curtido, para depilar las pellejas; así para depurar aguas duras, y en agricultura para neutralizar suelos ácidos.

1.2.1.1 Características Físico-Químicas de la Cal

Los antecedentes físico-químicos que se presentan en las tablas siguientes, corresponden a datos teóricos de los distintos tipos de cal que existen.

Tabla N° 3 Características físico-químicas de los distintos tipos de cal viva

Tipos de Cal	Unidad	Calcítica	Dolomítica	Magnesiana
Nombre Químico		Óxido de Ca	Óxido doble Ca-Mg	Óxido de Mg
Fórmula Química		CaO	CaO•MgO	MgO
Peso Molecular	g/mol	56,08	96,40	40,32
Punto de Fusión	°C	2,57		2,80
Índice de refracción		1,838		1,736
Calor de solución	Kcal	+ 18,33		
Formación cristalina		Cúbica		Cúbica
Solubilidad a 0°C	g/L	1,40		0,0068
Solubilidad a 100°C	g/L	0,54		0,0030
Peso específico		3,2 - 3,4	3,2 - 3,4	3,65
Densidad en granza	g/L	881-961	881-961	
Calor específico a 100°C	BTU/lb	0,19	0,21	

Angulo de reposo			50-55°	50-55°
Calor de Hidratación	cal/mol	43,3		28,9
Calor de Formación ΔH a 25°C	Kcal/mol	-151,7		-235,58
Energía Libre ΔG 25°C	Kcal/mol	-144,3		
% CaO puro	%	100	58,17	
% MgO puro	%		41,83	100

Fuente: National Lime Association, Chemical Lime Facts

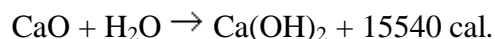
Tabla N° 4 Características Físico-químicas de las cales producidas por INACESA

PRODUCTOS		CAL VIVA		CAL HIDRATADA
		GRANULADA	MOLIDA	
		Calcítica	Calcítica	Calcítica
Químicas:				
CaO libre	%	75,0-79,0	75,0-79,0	50-65
CaO disponible o total	%	84,0 – 89,0	84,0 – 89,0	65,4 – 68,8
CaO crudo	%	0,5 – 1,5	0,5 -2,0	
CaO combinado	%	6,0 -13,0	6,0 – 13,0	
Valor alcalinizante	%	84,0 - 88,0	84,0 - 88,0	18,8 – 21,7
Pérdida al fuego	%	0,4 – 1,4	0,4 – 1,5	0,3 – 2,2
Humedad	%	ND	ND	%
Cinética	minutos	>5	>5	>1
Sólidos de la lechada	%	10-15	10-15	10-15
Envejecimiento recomendado para la lechada preparada con esta cal	horas	24	18	0,5
Físicas:				
Granulométricas				
Retenido en malla				
¾" (19,05mm)	%	0 - 5		
1/2" (12,79mm)	%	0 - 35		
200 (0,075mm)	%		20	
Densidad suelta	t/m ³	0,9 – 1,1	0,80	0,65
Densidad compactada	t/m ³	1,0 – 1,2	1,00	0,75
Ángulo de reposo	Grados	50-55	>60	>70
Velocidad mínima del flujo de esta lechada	m/s	>0,77	>0,77	>0,77

Fuente: La Cal es un Reactivo, COLOMA A. GUILLERMO, 2008 - INACESA (Industria Chilena)

1.2.2 Cal apagada

La cal reacciona con el agua, desprendiendo mucho calor. El producto de la reacción es el hidróxido cálcico, Ca(OH)_2 , y se llama *cal apagada*.



La cal viva obtenida de caliza pura, se conoce por **cal grasa**, y se apaga fácilmente. La procedente de caliza con arcilla o con carbonato de magnesio se llama **cal magra**, se apaga lentamente (a veces no del todo), y cuando se usa para mortero, éste, tarda en fraguar y tiene menor resistencia mecánica. Sin embargo, se trabaja más suavemente con la paleta, y por eso se usa en las operaciones de acabado.

La cal expuesta al aire absorbe lentamente dióxido de carbono y agua. Este material se llama **cal aérea**.

El hidróxido de calcio es poco soluble en agua, disminuyendo la solubilidad al aumentar la temperatura. La disolución se llama **agua de cal**. Una suspensión de hidróxido en agua se llama **lechada de cal**, que se usa a veces para blanquear. El hidróxido de calcio es la más barata de todas las bases.

1.3 Aplicaciones de la cal ^[5]

La cal se puede utilizar en innumerables procesos, los que se pueden resumir en las siguientes:

Usos Industriales

- ***Química orgánica e inorgánica***

Actúa como agente enlazante, colector o precipitante.

- ***Tratamiento de aguas***

Actúa como agente, coagulante, purificante, regulador de pH.

La cal viva se utiliza en forma de polvo en el tratamiento de aguas, para neutralizar, precipitar y decarbonatar. Sus ventajas sobre la cal hidratada son: menor precio y necesidad de almacenamiento para una misma cantidad de iones calcio. La causticidad del producto obliga a tomar precauciones especiales para su almacenamiento y conservación.

[5] La Cal: ¡Es un Reactivo Químico!

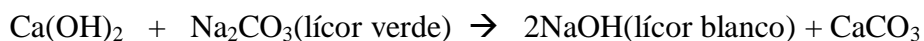
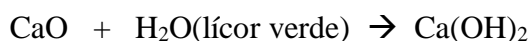
Antes de emplear la cal viva, es preciso “apagarla”, por hidratación en un depósito de mezcla y obtener lechada de cal. La reacción es exotérmica. La densidad de la solución varía entre 800 y 1,200 kg/m³. La pureza de la cal viva en óxido de calcio, para tratamiento de aguas, nunca debe ser inferior al 90%, con insolubles (carbonato cálcico y de sílice), inferiores al 5%.

La cal hidratada, Ca(OH)₂, tiene un empleo idéntico al de la cal viva. La densidad de la cal varía entre 400 y 600 kg/m³ y su solubilidad en el agua decrece con la temperatura.

La cal tamizada se utiliza en tratamiento de aguas en forma de polvo resultante de la hidratación de la cal viva, de forma que se anula químicamente su afinidad por el agua.

- ***Papel y pulpa***

Su principal acción es como agente enlazante, basificante. En este proceso es necesario transformar el licor verde generado al tratar la madera con algunos reactivos químicos (carbonato de sodio, sulfuro de sodio) en licor blanco (hidróxido de sodio, sulfuro de sodio), completando el ciclo de recuperación de reactivos. La cal viva, CaO, es apagada o hidratada con el agua del licor verde generando el hidróxido de calcio que reacciona con el carbonato de sodio del licor verde, produciendo el hidróxido de sodio acuoso, que es parte del licor blanco que se utiliza en el proceso de cocción, más carbonato de calcio sólido. Ambos compuestos son separados mediante procesos físicos. El líquido va al proceso de cocción y el sólido, carbonato de calcio, es enviado al horno de cal, donde nuevamente se convierte en óxido de calcio y se reutiliza en el proceso, las principales reacciones químicas que ocurren, con la cal, son:



- ***Alimentos y subproductos***

En la industria de alimentos la cal actúa como nutriente, coagulante y estabilizante, entre otros usos.

- ***Producción de azúcar***

En el caso de la producción de azúcar se utilizan ambos componentes de la caliza, esto es, el CO₂ de la fabricación de la cal y el óxido de calcio obtenido. El CO₂ producido por el horno de cal es capturado y enviado a un “scrubber” donde es utilizado previo al proceso del azúcar en la carbonatación y la mayor parte del CO₂ es recombinado en la lechada de cal con la cal.

La cal también se utiliza como aglomerante para separar los compuestos insolubles (impurezas), generados al procesar la caña de azúcar y la remolacha para extraer el jugo dulce. También se utiliza para neutralizar la acidez generada por los ácidos orgánicos indeseados que con la cal forman compuestos insolubles, que son separados por filtración o centrifugación, facilitando así el proceso de fabricación.

- ***Petrolíferos***

La cal en la industria del petróleo actúa como enlodante, sellante y regulador de pH. En este proceso los lodos de perforación son mezclas de arcillas, agua y productos químicos, entre ellos la cal, que se aplica en las operaciones de perforación para lubricar y enfriar el barreno y poder transportar los recortes de perforación hacia la superficie. Con ello se previene el colapso de las paredes del orificio o pozo y se controla el flujo ascendente del petróleo crudo o gas. Es circulado en forma continua hacia abajo por la tubería de perforación y hacia arriba hasta la superficie por el espacio entre la tubería de perforación y la pared del pozo. También hay antecedentes que mencionan que al igual que la soda cáustica, la cal se puede utilizar para evitar fermentación de otros reactivos, tal como la carboximetilcelulosa y también para corregir el pH cuando está bajo.

Aplicaciones en Construcción

- Ladrillos silíceos: actúa como agente enlazante.
- Ladrillos ligeros: actúa como agente enlazante.
- Hormigón liviano: actúa como agente reaccionante.
- Morteros: actúa como plastificante, desplazante.

- Pavimentos asfálticos: actúa como impermeabilizante, antidisgregante, estabilizante.
- Revestimientos protectores: actúa como pinturas.

Aplicaciones en Agricultura

- Mejoramiento de terrenos: actúa como regulador de pH.
- Nutriente vegetal: actúa como acelerante.
- Abonos: actúa como desodorizante y como nutriente.
- Insecticida, fungicida: actúa como diluyente.

Aplicaciones en Usos Diversos

- Pigmentos: actúa como agente enlazante, regulador de pH
- Barnices: actúa como neutralizante
- Caucho-gomas: actúa como desecante
- Control de contaminación: actúa como absorbente
- Cultivos marinos: actúa como descontaminante
- Granjas: actúa como germicida.

Aplicaciones en Minería Metálica

- **Fundición**

Actúa como fundente, agente enlazante. Absorbente de gases en humos y gases de chimeneas. Desmoldante de barras, catalizador en precipitación de níquel, lubricante en el estirado de alambres, entre otras.

- **En fundiciones de cobre**

La cal se usa como fundente (reemplaza ventajosamente a la caliza, dado a que ésta última necesita de un consumo energético para transformarse en cal y el calcio actúe como escorificante); como desmoldante en las canaletas de sangría y en las ollas de eje

y escoria, como desmoldante en las máquinas moldeadoras de blister, refinado a fuego y electrolítico.

Como neutralizante de los efluentes ácidos que generan las plantas de ácido asociadas a estas fundiciones.

- **En Cianuración de minerales auríferos y argentíferos**

La cal, además de tener un rol específico en cada uno de los procesos de cianuración ya

sea en pila por agitación, evita la generación de ácido cianhídrico en la hidrólisis de cianuro utilizado en varios procesos.

La cal es el reactivo más económico para utilizar en procesos de neutralización o alcalinización de pH, pero presenta serios problemas técnicos que dificultan enormemente la operación de un proceso de cianuración.

Si en el proceso de cianuración se compara el comportamiento técnico de la cal con otros alcalinizantes (NaOH; KOH; Na₂CO₃), se encuentra que la cal tiene un marcado efecto retardante en la disolución del oro y esto, se supone en teoría, es debido a la formación de peróxido de calcio, el que forma una capa que cubre la superficie del metal retardando la reacción o disolución de éste con el cianuro. Se considera que el peróxido de calcio se forma por la reacción de la cal con el agua oxigenada acumulada en la disolución.

1.4 Producción de cal viva

1.4.1 Procesos de obtención de cal ^[6]

Los procesos para la obtención de cal que se presentan a continuación de forma simplificada.

- **Extracción.** El proceso de producción de la cal comienza desde la exploración y selección del yacimiento de piedra caliza. Esta selección se realiza de forma tal que se asegure el abastecimiento de materias primas con las características

[6] Proceso de Obtención de la Cal

<http://www.quiminet.com/articulos/la-cal-tipos-y-proceso-de-obtencion-17648.htm>

físicas y químicas requeridas. Es entonces que se procede a la extracción de las canteras de caliza con pico y pala o con cargas de explosivos.

- **Trituración.** En esta etapa es sometida a un proceso de trituración que arrojará como producto trozos de menor tamaño que serán calcinados en hornos a temperaturas superiores a 900°C.
- **Calcinación.** La cal es producida por calcinaciones de la caliza y/o dolomía trituradas por exposición directa al fuego en los hornos (900° a 1200°). En esta etapa las rocas sometidas a calcinación pierden bióxido de carbono y se produce el óxido de calcio (cal viva). Es importante que el tamaño de la roca sometida a calcinación sea homogéneo para que la calcinación se realice en forma efectiva y en su totalidad en todos los fragmentos.
- **Enfriamiento.** Posteriormente se somete a un proceso de enfriamiento para que la cal pueda ser manejada.
- **Cribado.** Se somete a cribado separando a la cal viva en trozo y en guijarros de la porción que pasará por un proceso de trituración y pulverización.
- **Hidratación.** Consiste en agregar agua a la cal viva para obtener la cal hidratada. Este proceso de hidratación conlleva una reacción química exotérmica en la que se liberan grandes cantidades de calor. Durante la hidratación o apagado de la cal, las rocas de cal viva absorben agua desintegrándose y obteniéndose un polvo fino de color blanco.
- **Molienda y clasificación.** La cal hidratada se somete a una molienda fina para obtener un material homogéneo. Se clasifica el producto y se lo envía al proceso de envase.
- **Envase y despacho.** El material obtenido ingresa a la empacadora donde es enfundado, pesado y despachado.

Para la obtención de la cal viva y de cal hidratada a partir de la piedra caliza es necesario seguir un proceso de manufactura controlado como el que a continuación se presenta:

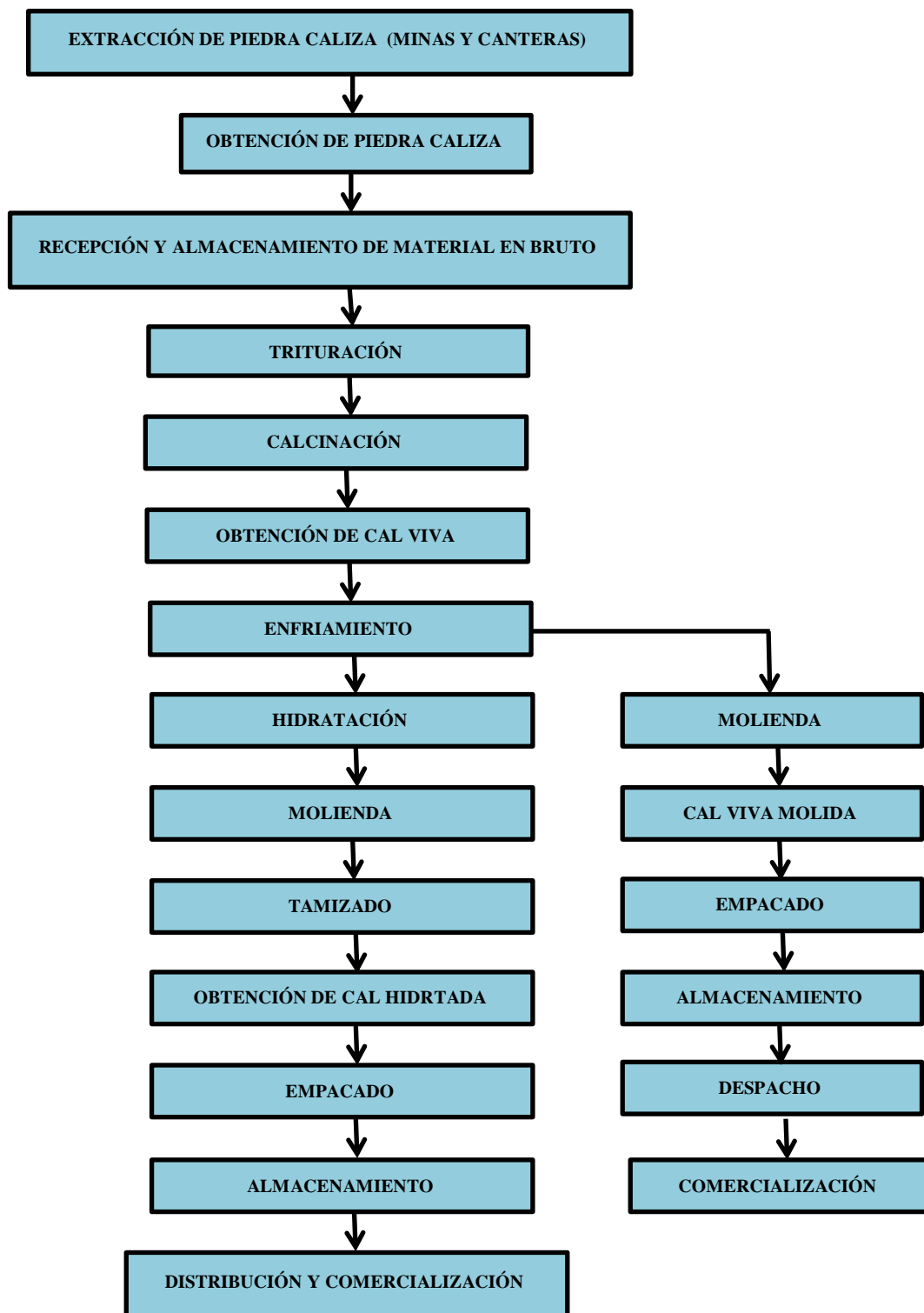


Figura N° 2 Diagrama de flujo del tratamiento de la piedra caliza

1.4.2 Horno para la producción de Cal

Un horno de cal es una construcción en la cual la piedra caliza es calentada a una temperatura tal que libere el CO_2 , convirtiendo la piedra caliza en cal viva. El calor es proporcionado por combustibles adecuados que pueden ser colocados en capas entre la piedra caliza o mezclados con ésta. Los combustibles gaseosos o líquidos son inyectados por los lados del horno o quemados en cámaras adyacentes, desde las cuales los gases calientes ingresan al horno.

Es necesario un control cuidadoso para mantener la temperatura correcta, el tiempo suficiente, como para quemar completamente la piedra para la correcta manufactura posterior que es la cal hidratada.

La piedra caliza subhorneada no se hidratará, mientras que el material sobrehorneado es muy duro y denso para apagarse, o se hidrata muy lentamente.

1.4.2.1 Principales componentes del Horno

1.4.2.1.1 Cimientos y base del horno

El terreno debe ser firme y con las dimensiones adecuadas para soportar al cuerpo del horno y al contenido del mismo, las cimentaciones deben ser diseñadas con un criterio adecuado desde el punto de vista de ingeniería.

1.4.2.1.2 Forma y dimensiones

El área de la sección transversal está relacionada a la producción deseada, una planta circular proporciona una mejor distribución del calor; la relación entre altura y diámetro debe ser al menos de 4:1 para un flujo de gas óptimo; la altura debe estar relacionada al tipo de piedra caliza, ya que las piedras suaves tienden a molerse bajo presión, restringiendo así el flujo del gas.

1.4.2.1.3 Paredes estructurales

Las paredes deben soportar la presión lateral de la piedra caliza, proporcionando un mayor grosor de la pared en la base, o contrafuertes, o mediante bandas de tracción de acero a intervalos de 800mm, deben resistir el agrietamiento que podrían ocasionar la expansión del calor (empleando pequeños ladrillos en lugar de bloques grandes, mortero de arena y

cal en juntas angostas); el espesor de la pared debe tener 500mm como mínimo para un buen comportamiento térmico y debe ser un material resistente a los agentes atmosféricos.

1.4.2.1.4 Revestimiento

El revestimiento debe tener un espesor de 220mm como mínimo, en la parte superior del horno, resistente a la erosión (ej. Piedra dura o ladrillos azules especiales); en la zona de cocción y debajo, resistente al calor y a la acción química (ladrillos refractarios duros, de textura fina colocados con juntas muy finas de mortero de arcilla cocida).

1.4.2.2 Horno de columna ^[7]

Este tipo de hornos utiliza la piedra caliza con un rango de 50 a 150mm de longitud y un radio aproximado de 2 a 1 con lo que respecta a su longitud. El combustible más ampliamente utilizado es de un grado denso de coque con baja reactividad y bajo contenido de ceniza, dicho combustible es más liviano y pequeño que la caliza y se mueve goteando entre los intersticios.

La calidad de la cal tiende a ser moderada, con una reactividad baja. La retención del azufre del combustible es alta.

Las zonas de trabajo en este tipo de horno son:

- **Zona de precalentamiento**

La piedra caliza es precalentada desde la temperatura ambiente hasta 800°C por el contacto directo con los gases provenientes de la zona de calcinación, es decir los gases de combustión.

- **Zona de calcinación**

El combustible se quema en aire precalentado de la zona de enfriamiento y dependiendo del diseño en el aire adicional de la “combustión” agregado con el combustible. Esto produce una temperatura sobre los 900°C y causa la disociación de la piedra caliza en dióxido de carbono y cal viva.

- **Zona de enfriamiento**

La cal viva que sale de la zona de calcinación a 900°C, es enfriada por el contacto directo con aire que entra por la parte inferior del horno.

[7] Diseño de un Horno para la producción de cal viva y cal hidratada de 120 toneladas de producción diaria

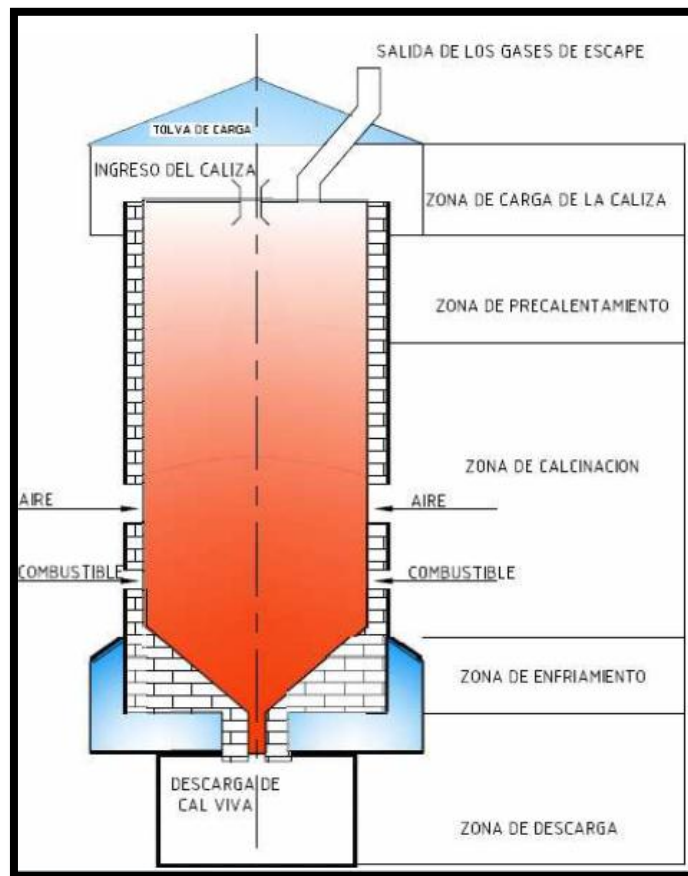


Figura N° 3 Representación gráfica de un horno de columna

Tabla N° 5 Consideraciones Teóricas para la eficiencia de combustión del fuel oil

Parámetros	Unidades	Valores
Gases producidos	%	5-10
Pérdidas de energía	%	7-14
Exceso de aire	%	25-30
Relación aire-combustible	Kg aire/Kg combustible	3-5

Fuente: Handerberg H., System Design Heat, California, 1980

1.4.3 Factores que afectan la calidad del CaO industrial

Las condiciones de calcinación afectan significativamente la calidad de cal viva ^[8], CaO disponible, que resulta de este proceso. Los siguientes factores son los más determinantes de la calidad del CaO total o disponible:

- ◆ Composición química de caliza.
- ◆ Tamaño de la Piedra Caliza
- ◆ Temperatura del horno durante el período de calcinación
- ◆ Tiempo de residencia de la cal en el interior del horno
- ◆ Concentración del anhídrido carbónico en la atmósfera del horno.

1.4.3.1 Composición química de la caliza, CaCO_3 más impurezas

Para obtener una cal de calidad, la caliza utilizada debe tener una cantidad mínima de impurezas del tipo partículas de Si, debido a que esta reacciona con el CaO formando silicatos, los cuales se acumulan en el fondo de los hornos, obstruyendo el paso del material, además, de que la dureza de la cal obtenida, depende de las impurezas de la caliza utilizada como también de la temperatura de calcinación, una impura, da una cal dura si se calcina a temperaturas elevadas.

Sin embargo, cabe mencionar que la composición química de la caliza, carbonato de calcio con impurezas, no se puede controlar sin un impacto del mayor costo en la fabricación de cal viva, por consiguiente, se aceptan generalmente variaciones.

De esta forma se opta por calentar uniformemente la caliza en el horno, por eso se debe controlar continuamente la temperatura de calcinación, el tamaño de partícula debe ser relativamente uniforme. Hay que evitar largos tiempo de residencia en el horno.

1.4.3.2 Tamaño de Piedra Caliza

El tamaño de partícula de caliza debe ser pequeño, típicamente alrededor de 1,5". Sin embargo, debido a la naturaleza del funcionamiento del chancado, en realidad hay un rango en tamaño que va desde 1,5" a 2". En las grandes industrias, la caliza para producir cal se encuentra en dos rangos de 6 mm a 15 mm y de 15 mm a 50 mm.

[8] La Cal: ¿Es un Reactivo Químico!

Aunque el tiempo de residencia y la temperatura en el horno son constantes, la penetración del calor en las partículas de caliza es diferente, debido a la variación del tamaño de ésta.

Con un tamaño de mineral más grande, el calor no penetra totalmente al centro, por consiguiente el centro de estos minerales queda crudo, como carbonato de calcio, mientras se convierte el exterior a CaO; estos núcleos o centros son llamados “arena” en la lechada de cal. Para minerales de tamaño intermedio, la penetración del calor es algo más completo y se convierte todo el mineral en CaO, generándose una capa exterior de CaO enlazado a la sílice y alúmina presente en la materia prima. Para las partículas más pequeñas, el calor ingresa rápidamente al centro y se sobrecalienta la superficie, formando una capa externa, una cáscara exterior más gruesa y algo dura, donde el agua le cuesta penetrar, por consiguiente, según el equipo utilizado para la preparación de la lechada de cal, se puede retardar o prevenir el proceso de apagado.

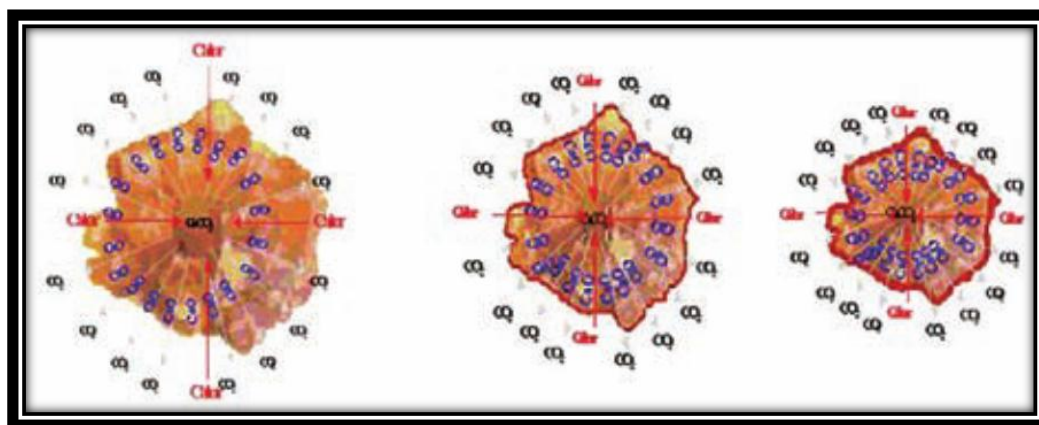


Figura N° 4 Piedras calizas, de diferente tamaño y geometría, sometidas a calcinación

Así pues, según el gráfico anterior, se observa piedras calizas, de diferente tamaño y geometría, sometidas a temperatura y tiempo de residencia constante en un horno durante la calcinación, en el centro de la partícula queda material crudo y en la superficie el material quemado. Los productos obtenidos con las partículas de tamaño grandes y medio son altamente reactivas (cal viva quemado suave) y las partículas más pequeñas, cal viva quemado duro, generalmente son de reactividad media e incluso podrían alcanzar reactividad baja si son calcinadas a “muerte”. Reactividad se refiere en este caso al tiempo que demora una disolución de cal con una concentración al 25%, en peso, en alcanzar una

diferencia de temperatura de 40° Celsius, ensayo utilizado para diseñar o elegir el equipo hidratador más adecuado con el fin de lograr como producto un polvo fino y seco.

1.4.3.3 Temperatura del horno

La temperatura teórica requerida para calcinación es de aproximadamente 900 °C, sin embargo, en la práctica encontramos que la temperatura es mucho mayor, alrededor de los 1350 °C. La determinación de la temperatura correcta en el horno calcinador, es hoy mas un arte que una ciencia, y esta dependerá del tamaño de la piedra caliza, del tipo de horno y el tipo de combustible usado.

El operador del horno calcinador debe experimentar para determinar la temperatura exacta necesaria, para el tamaño de la piedra caliza que se utiliza. En general, es mucho mejor usar una temperatura baja con el menor tiempo de residencia posible, para lograr la calcinación completa. Una temperatura alta de calcinación causara un alto encogimiento y una reducción del volumen de la cal. Una alta temperatura, causará también una recarbonatación de la superficie de los guijarros de cal debido a la presencia de CO₂ proveniente de la caliza y también producto de la combustión del horno calcinador, lo que hará que la cal no sea porosa, cal que no es conveniente para la hidratación.

La temperatura del horno afecta la calidad del CaO producido y por ende al hidróxido resultante desde el apagado de dicha cal viva. Tamaños de partícula muy pequeños con gran superficie específica, es el producto final más deseable de óxido del calcio.

En la operación industrial, el control de temperatura no se puede realizar directamente en la partícula, como tampoco es factible contar con un tamaño mono granular y una forma geométrica única de ésta, por lo que el tiempo de calcinación y el control en forma indirecta de la temperatura: son las variables que permiten de algún modo tener un control sobre una calcinación adecuada, para que el efecto sobre el área superficial sea menor.

Las variables que afectan el grado de disociación son:

- Características de la caliza
- Distribución de tamaño de las partículas

- Forma de las partículas
- El perfil de temperatura en la zona de calcinación y
- La velocidad de intercambio del calor entre los gases y las partículas

1.4.3.4 Tiempo de residencia

Durante el proceso de calcinación, el tiempo de residencia de la caliza, CaCO_3 más impurezas, en el horno es muy crítico. Es importante que el tiempo de residencia sea lo más corto posible. Sin embargo, se debe dar margen para que el calor penetre las partículas de caliza por suficiente tiempo y conduzca el CO_2 fuera de ellas. La temperatura y el tiempo son variables de control de la calcinación, es decir, hay calcinaciones con baja temperatura y alto tiempo de residencia, o, con alta temperatura y bajo tiempo de residencia, siendo opción de cada fabricante elegir lo que satisface su sistema.

1.4.3.5 Atmósfera del horno

Además de la temperatura del horno y del tiempo de residencia, la atmósfera del horno afecta la calidad del producto obtenido, CaO disponible. Así como aumenta la temperatura en el CaCO_3 y el gas de CO_2 se suelta desde la caliza, para producir CaO disponible, se debe entregar al CO_2 la salida o escape necesario del horno hacia afuera. El CaO disponible tiene la afinidad de absorber humedad y CO_2 para convertirse en CaCO_3 . El efecto de esta conversión es más pronunciado en las partículas pequeñas de CaO debido a la mayor superficie específica de éstas.

1.5 Combustión

La combustión es una reacción química de oxidación en la que un elemento combustible se combina con otro comburente (generalmente oxígeno en forma de O_2 gaseoso), desprendiendo calor y produciendo un óxido; la combustión es una reacción exotérmica (cuando en el proceso se libera calor se dice que es exotérmico.) debido a que su descomposición en los elementos libera, calor al quemar y luz al arder.

Para que la reacción pueda llevarse a cabo debe alcanzarse la mezcla adecuada de combustible y aire, y se debe mantener la temperatura mínima de ignición.^[9]

[9] Combustión

En una reacción de oxidación tendremos:

Primer Miembro

Combustible + Comburente

→

Segundo Miembro

Gases de combustión + calor

1.5.1 Fases de la reacción de combustión

Se pueden distinguir tres fases en la reacción de combustión:

- **Fase de prerreacción (formación de radicales).** Los compuestos hidrocarbonados se descomponen dando lugar a la formación de *radicales*, que son unos compuestos intermedios inestables y muy activos, para que de este modo el carbono y el hidrógeno puedan reaccionar con el oxígeno.
- **Fase de Oxidación:** En esta fase se produce la combinación entre los elementos y el oxígeno. Es una fase muy exotérmica y es cuando tiene lugar la propagación de la llama.
- **Fase de Terminación:** Aquí es cuando se forman los compuestos estables. El conjunto de estos compuestos es lo que llamamos *gases de combustión*.

Es necesario que se produzca una gran coordinación entre la 1ª y la 2ª fase, ya que si no podría llegar a producirse una explosión, por acumulación de radicales.

1.5.2 Clases de reacciones de combustión

Las reacciones se pueden clasificar según el modo en el cual transcurran de la siguiente manera:

- Combustión neutra o *estequiométrica*
- Combustión incompleta o *imperfecta*
- Combustión completa

1.5.2.1 Combustión neutra

Es aquella que se produce cuando el aire empleado aporta la cantidad justa de oxígeno para que todos los reactivos se transformen en productos. Para que la estequiometría se cumpla, hay que considerar todos los elementos que sufren la reacción de combustión en el combustible. Cuando la reacción tenga lugar totalmente, entonces no habrá H, O, S y C,

que se transformarán en productos correspondientes que irán en los *gases de combustión*. Como inertes aparecerá, por lo menos, el nitrógeno.

A veces, a los gases de combustión se les llama poder comburívoro o poder fumígeno. Se define éste como los gases húmedos totales procedentes de una *combustión neutra o estequiométrica* (de todos los elementos combustibles e inertes también).

1.5.2.2 Combustión incompleta

Es aquella en la que por defecto en el suministro de aire no hay oxígeno necesario para que se produzca la oxidación total del carbono. Esto quiere decir que no todo el carbono se va a transformar en CO_2 y aparecerá también como producto de combustión el CO. Aparecen entonces los inquemados. Los inquemados también se pueden producir por defecto en el aparato quemador. Los *inquemados* se definen como la materia combustible que ha quedado sin quemar o parcialmente quemada. Pueden ser de dos clases:

- **Sólidos:** Carbono (hollín). Provocan un ennegrecimiento de los humos de combustión
- **Gaseosos:** CO, H_2

Cuando aparecen inquemados es señal de que no se ha aprovechado bien el combustible, por lo que la combustión que se está realizando es mala y se deberían tomar medidas de algún tipo para mejorarla.

1.5.2.3 Combustión completa

Para que se produzca una combustión completa se hace necesario aportar un exceso de aire, es decir, de *oxígeno*. El exceso se realiza sobre la cantidad estequiométricamente necesaria para que todos los productos combustibles sufran la oxidación (tanto el C como el O ó el H). En este caso no se van a producir inquemados. En la práctica se hace difícil conseguir la combustión completa. Por ello es necesario aportar un exceso de aire. El *exceso de aire* se define como la cantidad de aire por encima del teórico que hay que aportar para que se realice la combustión completa del combustible.

En una combustión completa el total del combustible reacciona con el oxígeno y el producto resultante es sólo CO_2 (g) y H_2O (l). La ecuación puede balancearse, los productos de esta combustión son solamente CO_2 , H_2O , O_2 y N_2 .

1.5.2.4 Procesos de combustión teórico y real ^[10]

1.5.2.4.1 Proceso de Combustión Teórico

El proceso de combustión ideal durante el cual un combustible se quema por completo con aire teórico se conoce como *combustión estequiométrica o teórica* de ese combustible.

- **Aire teórico**

Denominado aire estequiométrico, se define como la cantidad mínima necesaria para la combustión completa de un combustible. De manera que cuando un combustible se quema por completo con aire teórico, no estará presente oxígeno no combinado en el producto de los gases. El aire teórico también se conoce como cantidad de aire químicamente correcta, o aire 100% teórico. Entonces un proceso de combustión con menos cantidad de aire teórico está condenado a ser incompleto.

1.5.2.4.2 Proceso de Combustión Real

En los procesos de combustión reales es una práctica común emplear más aire que la cantidad estequiométrica, con el fin de aumentar las oportunidades de combustión completa o para controlar la temperatura de la cámara de combustión.

- **Exceso de Aire**

Es la cantidad de aire en exceso de la cantidad estequiométrica. Suele expresarse en términos del aire estequiométrico como aire de exceso porcentual o aire teórico porcentual. Así por ejemplo 50% de exceso de aire es equivalente a 150% de aire teórico.

La cantidad de aire utilizada en los procesos de combustión se expresa también en términos de la razón de equivalencia, la cual es la proporción entre la relación combustible-aire real o la relación combustible-aire estequiométrico.

[10] Termodinámica

1.5.2.4.3 Relación aire combustible ^[11]

Se representa como AC y es una cantidad utilizada en el análisis de procesos de combustión para cuantificar las cantidades de aire y combustible. Suele expresarse en una base de masa y se define como la proporción entre la masa del aire y la masa del combustible en un proceso de combustión. Es decir;

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} \quad \text{Ec. N}^\circ 1$$

La masa m de una sustancia se relaciona con el número de moles N por medio de la relación $m=NM$, donde M es la masa molar.

La relación aire-combustible puede expresarse también en una base molar como la proporción entre el número de moles del aire y el número de moles del combustible. El recíproco de la relación aire-combustible se conoce como relación combustible-aire.

La predicción de la composición de los productos es relativamente fácil cuando se supone que el proceso de combustión será completo y que se conocen las cantidades exactas de combustible y aire utilizados. Todo lo que se necesita en este caso es aplicar el principio de la conservación de la masa a cada elemento que aparece en la ecuación de la combustión, sin necesidad de tomar otras medidas. Sin embargo cuando uno trata, con procesos de combustión reales, las cosas no son tan sencillas, Por alguna razón, es difícil que los procesos de combustión reales, siempre sean completos, incluso en la presencia de un exceso de aire. Por tanto, es imposible predecir la composición de los productos con base solo en el principio de la conservación de la masa. Por ello la única opción es medir directamente la cantidad de cada componente en los productos.

1.5.2.5 Principales componentes del sistema de combustión

A continuación se definen los principales componentes del sistema de combustión en función a los utilizados por las plantas de cal de la Corporación “Los Nevados”.

[11] Termodinámica

1.5.2.5.1 Horno

Es un dispositivo que genera calor y que lo mantiene dentro de un compartimento cerrado. Se utiliza para calentar o secar materiales, como en la industria. La energía calorífica utilizada para alimentar un horno puede obtenerse directamente por combustión (leña, gas u otro combustible líquido).

1.5.2.5.2 Hogar o cámara de combustión

Es la zona donde tiene efecto la combustión del combustible y que su ubicación en el horno vertical característico en la Corporación Los Nevados, corresponde a la zona de calcinación.

Cumple las siguientes funciones:

- Permite el ingreso de la mezcla aire-combustible
- Confinamiento de reactantes y productos
- Redistribución y almacenamiento de calor.

1.5.2.5.3 Quemador

El quemador es el principal componente del equipo de combustión para fuelóleo y gas natural. Admite el combustible y el aire hacia el hogar, garantizando una combustión segura y eficiente, en particular cuando se está operando a plena potencia.

El diseño del quemador determina:

- Las características de la mezcla combustible aire
- El tamaño y distribución de las partículas de combustible
- El perfil envolvente de la llama

La configuración del sistema de combustión comprende:

- El medio de transporte
- La medida y regulación del combustible y del aire hacia el hogar
- Los quemadores, ignitores y equipo de seguridad de la llama

1.5.2.5.4 Ventilador

Un ventilador es un tipo de centrifuga de alta presión. Puede ser usado para elevar la presión del gas o aire encima de la atmosférica con el fin de forzar el flujo a través de alguna resistencia, reduciendo la presión del gas o de aire debajo de la atmosférica con el fin de inducir el flujo a través de una cierta resistencia, o impulsar aire o presión de gas entre las resistencias en una línea. ^[12]

1.6 Combustible

Usualmente, es un compuesto orgánico, como el carbón vegetal, la madera, los plásticos, los gases de hidrocarburos, petróleo y sus derivados, etc.

Cada combustible tiene una temperatura de ignición, (también llamado Punto de Ignición) distinta, a la que es necesario llegar para inflamarlo. En la mayoría de los casos, una vez que comienza la reacción de oxidación, el calor desprendido en el proceso sirve para mantenerlo.

Cada combustible libera, al quemarse, una cierta cantidad de energía en forma de calor, igual a la energía que mantenía unidos los átomos en las moléculas del combustible, menos la empleada en la formación de los nuevos compuestos (gases resultantes de la combustión o gases quemados). La cantidad de energía que cada combustible produce se expresa por su poder calorífico.

- **Poder calorífico**

El poder calorífico es la cantidad de calor desprendido por la combustión completa del combustible. O se podría decir que es la cantidad de energía que la unidad de masa de materia puede desprender al producirse una reacción química de oxidación. Se expresa en las unidades de KJ/Kg o Kcal/Kg.

- **Punto de ignición**

Se define el punto de ignición de un combustible como la temperatura a la cual, una vez iniciada la llama, esta ya no se extingue. Es esta temperatura de 20 a 60 C más alta que la temperatura de *inflamación*.

[12] Combustion Handbook

North American, 2a Ed., Ohio, 1978

1.6.1 Tipos de combustibles ^[13]

Los combustibles industriales son generalmente de origen fósil: los principales son el fuel oil -2- (liviano) y el fuel oil -6- (residual).

1.6.1.1 Combustibles sólidos

Entre ellos podemos encontrar:

- ✓ **Maderas:** utilizados como combustibles en bosques o en estufas hogareñas (poder calorífico hasta 4500 cal / Kg).
- ✓ **Carbones fósiles:** cuanto más antiguos son los restos orgánicos y mayores presiones soportan, mayor es la cantidad del carbón.
- ✓ **Antracita:** son los carbones más antiguos. Tienen gran contenido de carbono y pocos materiales volátiles y oxígeno. (7800 a 8600 cal /kg).
- ✓ **Hulla:** son los carbones más utilizados en la industria, se distingue tres tipos: hulla seca, hulla grasa y la hulla magra.
- ✓ **Lignito:** son combustibles que proceden de la carbonización natural de la madera. Al quemarse desprende el azufre provocando mal olor y daños en metales y estructuras.
- ✓ **Turba:** son carbones de menor calidad. De 3200 a 4000 cal / Kg.
- ✓ **Residuos orgánicos:** son restos muy grasos comprendidos entre los carbones y el petróleo. Prácticamente no se utilizan.
- ✓ **Carbón vegetal o de leña:** provienen de la carbonización de la madera. Tiene de 6000 a 7000 cal / Kg, no contiene azufre.

1.6.1.2 Combustibles gaseosos

Los combustibles gaseosos son los que mejores condiciones tienen para entrar en combustión.

- ✓ **Gas natural:** Es el gas que se obtiene directamente de los yacimientos petrolíferos. Este gas es el encargado de empujar al petróleo a la superficie. Su uso es muy utilizado en los alrededores de los yacimientos. Su poder calorífico es de 9500 cal / m³.

[13] Tipos de Combustibles

- ✓ **Gas de alumbrado:** Se lo denomina también gas de hulla. Se lo obtiene de la combustión incompleta de la hulla. Por cada 100 Kg. de carbón que se carbonizan, se obtienen unos 30 ó 35 metros cúbicos de gas de alumbrado. Es un excelente combustible, usado principalmente para usos domésticos y para pequeños hornos industriales. Su precio es elevado. Su poder calorífico es de entre 4380 y 5120 cal / m³.
- ✓ **Acetileno:** Se obtiene del tratamiento del carburo de calcio del agua. Es un excelente combustible. Su poder calorífico es superior a 18000 cal / m³.
- ✓ **Gas de agua:** Se obtiene haciendo pasar vapor de agua a través de una masa de carbón de coque incandescente. Su poder calorífico es de 2420 cal / m³.
- ✓ **Gas de aire:** Se lo obtiene haciendo pasar aire por un manto de hulla o lignito incandescente de gran espesor. Su poder calorífico es de 1080 cal / m³.
- ✓ **Gas pobre o mixto:** Se lo obtiene haciendo pasar una corriente de aire húmedo, es decir, una mezcla de aire y vapor de agua a través de una masa de gran espesor de hulla o lignito incandescente. La mezcla de vapor de agua y aire, quema parcialmente, produciendo cantidades variables de óxido de carbono e hidrógeno, estas sustancias van a constituir los elementos activos del gas mixto. Tiene un poder calorífico de entre 1200 y 1500 cal / m³.
- ✓ **Gas de altos hornos:** Se obtiene de los hornos de fundición. Al cargar un alto horno con mineral para obtener lingotes de hierro, se desprende una serie de gases que salen parcialmente quemados y pueden ser posteriormente utilizados en la misma planta industrial como combustible. Se los utiliza principalmente para la calefacción o para la producción de fuerza motriz. Su poder calorífico es de 900 cal / m³.

1.6.1.3 Combustibles líquidos

- ✓ **Nafta:** Es un combustible altamente volátil, muy inflamable y es utilizado, sobre todo, como combustible para motores a explosión. Su poder calorífico es 11000 cal / Kg.

- ✓ **Kerosene:** Constituye un derivado menos volátil e inflamable que la nafta. Su poder calorífico es de 10500 cal / Kg. Se utiliza en calefacción y en las turbohélices y reactores de las turbinas de gas de los motores de aviación.
- ✓ **Gas-oil:** es denso, menos volátil que el petróleo. Su poder calorífico es igual a 10250 cal / Kg. Se lo utiliza mucho en calefacción y para hornos industriales y metalúrgicos.
- ✓ **Diesel-oil:** es un subproducto obtenido de los derivados más pesados del petróleo. Se quema más lentamente que el gas-oil. Se utiliza sólo en motores Diesel lentos en los cuales el combustible dispone más tiempo para quemar. Su poder calorífico es de 11000 cal / Kg.
- ✓ **Fuel-oil:** es un subproducto obtenido de los derivados más pesados del petróleo. Se quema con dificultad. Su poder calorífico es igual a 10000 cal / Kg.
- ✓ **Fuel oil residual:** Fuel oil residual se define como una fracción obtenida de la destilación del petróleo, ya sea como un destilado o un residuo. Es un producto líquido de petróleo que se quema en un horno o caldera para la generación de calor o utilizado en un motor para la generación de energía. Fuel oil residual se utiliza principalmente como combustible del quemador en numerosas aplicaciones industriales y comerciales, incluyendo la industria de servicios, la industria naviera y el papel, fábricas de acero, fabricación de neumáticos, las escuelas y los procesadores de alimentos, industrias cementeras y de cal.
- ✓ **Aceite quemado:** El aceite quemado se destina como combustible en instalaciones con alta potencia térmica, altas temperaturas, gran consumo de combustible y alta producción de gases. El mayor ejemplo de esto son los hornos de clinker en las cementeras, estos hornos queman el aceite usado y los contaminantes de éste especialmente los metales quedan incorporados al cemento, por lo que no representa problemas de contaminación atmosférica.
- ✓ **Alquitrán de hulla:** es un subproducto obtenido de la fabricación del coque. Puede quemar directamente pero se lo utiliza poco como combustible, usándolo sólo en hogares especiales para este, que puedan vencer la viscosidad del mismo. Su poder calorífico es de 9100 cal /Kg.

- ✓ **Alquitrán de lignito:** se lo obtiene de la destilación del lignito. Su poder calorífico es 9600 cal / Kg. Es muy similar al gas-oil, pero al utilizarlo en motores diesel, su comportamiento es muy inferior del de los derivados del petróleo.
- ✓ **Alcoholes:** pueden quemar muy fácilmente. Tienen diversos orígenes (derivaciones de: petróleo, vino, papas, etc.). los alcoholes puros, como combustibles tienen muy poco uso. Su mayor empleo esta en la fabricación de mezclas con benzol, bencina o naftas con objeto de mejorar la calidad de las mismas.

1.7 Productos de la combustión ^[14]

Los principales productos de la combustión de combustibles de origen hidrocarburífero son:

- CO₂, H₂O, N₂, O₂
- CO, SO_x, NO_x
- Hollín, Hidrocarburos mal quemados
- Metales fundidos/solidificados

1.7.1 Formación de SO_x

Se debe a la presencia de azufre en el combustible, es así que para disminuir su formación se logra reduciendo el contenido de S del combustible. El fuel oil pesado contiene del 1-3%, no obstante las entidades gubernamentales vinculadas a la producción de combustibles indican que el máximo es del 1,8%. Una vez generado es complicado extraer el SO_x. Debe usarse lavado de gases o procesos catalíticos- químicos.

1.7.2 Formación de NO_x

El NO_x puede formarse tanto a partir del nitrógeno del combustible, como del nitrógeno molecular del aire. La formación de N₂O, NO₂ y NO₃, tiende a aumentar con la temperatura. Por tanto aquello que reduzca la temperatura reduce la formación de NO_x.

1.7.3 Formación de CO

Normalmente no debería darse CO en combustión industrial, en la que se usa del 15-25% de aire en exceso. El monóxido de carbono se da en motores de combustión interna. Sin

embargo de descalibrarse el caldero o al operar a baja carga podría darse operación con déficit de aire que conduce a presencia de CO.

1.7.4 Dióxido de carbono (CO₂)

Las emisiones de óxidos de carbono proveniente de la descarbonatación de la caliza, además del propio proceso de combustión de los combustibles fósiles. Este gas, aun no siendo nocivo, por su condición de gas de efecto invernadero, hace que cobre gran importancia su reducción y control.

Las emisiones del CO₂ que resultaban de la combustión del combustible han ido progresivamente reduciéndose debido al incentivo económico de la reducción al mínimo del consumo de energía. Ha habido una reducción de las emisiones en un 30% en los 25 últimos años debido a procesos más eficientes y fundamentalmente a la utilización creciente de combustibles alternativos y, uso de combustibles derivados de residuos.

1.7.5 Vapor de agua (H₂O)

Proveniente del propio proceso de combustión, y de la deshidratación de las materias primas alimentadas al horno.

1.7.6 Oxígeno

Que se emplea en exceso respecto al estequiométrico.

1.7.7 Compuestos orgánicos volátiles (COVs).

El contenido de estos compuestos en los gases emitidos se ve afectado, además de las condiciones de la combustión, por el contenido en materia orgánica de las materias primas, que se ven parcialmente oxidadas en contacto con los gases del horno, lo que afecta al nivel de compuestos orgánicos volátiles en los gases.

1.7.8 Metales pesados.

Las materias primas y los combustibles contienen en función de su origen, siempre, metales en concentraciones variables. El proceso de derivados de cal tiene una gran capacidad para fijar los metales que entran con los materiales o los combustibles. Los metales son embebidos en la estructura cristalina del producto, no afectando a su calidad.

El principal foco emisor de metales es el sistema de horno, incluyendo los gases de combustión y el aire de los enfriadores. Las partículas emitidas en estos flujos contienen muy pequeñas cantidades de compuestos metálicos tales como zinc (Zn), cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb), talio (Tl) y arsénico (As). La concentración de las emisiones de metales varía ampliamente en función de las materias primas, los combustibles y de los ciclos en el sistema de horno.

En el polvo recogido en el filtro (de mangas o electrofiltro) son retenidos todos los metales: metales de baja (Cr, Cu, Ni, Ti, Ag, etc.) y media volatilidad (Cd, Pb, Se, Zn, Sb, Se, Na y K), a excepción de los metales volátiles, como el Hg, Tl cuya presencia, se limita estrictamente.

El talio condensa aproximadamente entre 300-350°C, el mercurio entre 120-150°C. Mientras que el talio se precipita casi totalmente sobre las partículas de polvo que abandonan el horno, sólo parte del mercurio es recogido por los sistemas de filtros. Por ello, el Hg es el único metal que puede ser emitido con la corriente de gases limpios que abandonan la chimenea.

Por tanto, el control de las emisiones mediante el uso de eficientes equipos de separación de partículas, es una medida directa en el control de las emisiones de metales al medioambiente.

1.7.9 Dibenzo-p-dioxinas y dibenzofuranos policlorados (PCDD/PCDFs)

La presencia de cloro o hidrocarburos precursores en materias primas o combustibles en cantidades suficientes, podría ser causa de formación de estos productos en los procesos de combustión.

1.7.10 Partículas sólidas

Las principales fuentes de partículas por chimenea son los hornos. En los cuales circula grandes volúmenes de gases cargados de partículas, que deben ser desempolvados. El diseño y la fiabilidad de los precipitadores electrostáticos modernos y de los filtros de mangas aseguran que las partículas emitidas se puedan reducir a niveles no significativos; incluso se han podido lograr en algunas instalaciones niveles de emisión por debajo de 10 mg/m³.

1.8 Aceites usados como combustible alternativo

Son todos los aceites industriales con base mineral o sintética, lubricantes que se hayan vuelto inadecuados para el uso que se les hubiere asignado inicialmente y, en particular, los aceites usados de los motores de combustión y de los sistemas de transmisión, así como los aceites minerales lubricantes, aceites para turbinas y sistemas hidráulicos (*).

Los aceites residuales generados representan más del 60% de los aceites lubricantes consumidos. Esto hace que los aceites usados sean uno de los residuos contaminantes más abundantes que se generan actualmente, pudiendo alcanzarse la cifra de 24 millones de Tm/año.

Las fuentes más grandes de generación de aceite usado son: los vehículos motorizados (aceites de lubricación), los motores de combustión y cajas de velocidades, los sistemas hidráulicos, transformadores y otras aplicaciones industriales. Además de ser utilizados como lubricantes, los aceites minerales obtenidos a partir del petróleo crudo, suelen también ser usado como refrigerante, aislante, dispersante, etc., siendo el de mayor consumo el aceite automotriz.

Por su elevada capacidad calorífica, el aceite usado se constituye en uno de los residuos con mayor potencial para ser empleado como combustible por las industrias, independientemente de los resultados alcanzados en la primera fase, así como su uso generalizado en buena parte de los distintos segmentos industriales, aún cuando se oculta su empleo por temor a sanciones.

Los aceites usados son considerados residuos peligrosos y, ambientalmente, los de motor tienen un potencial de alta peligrosidad.

1.8.1 Composición de Aceites Usados ^[15]

Los aceites lubricantes están compuestos por una mezcla de una base mineral o sintética con aditivos (1-20%). Durante su uso se contaminan con diversas sustancias como:

- ✓ Agua
- ✓ Partículas metálicas ocasionadas por el desgaste de las piezas en movimiento

(*) Definición de aceites usados según la legislación europea

[15] Composición de Aceites Usados

- ✓ Ácidos orgánico o inorgánicos por oxidación o de azufre de los combustibles.
- ✓ Compuestos de azufre.
- ✓ Restos de aditivos: fenoles, compuestos de zinc, cloro, y fósforo.
- ✓ Compuestos clorados: disolventes, PCBs y PCTs.
- ✓ Hidrocarburos poli nucleares aromáticos (PNA).
- ✓ Pesticidas.
- ✓ Residuos tóxicos de cualquier tipo.

La cantidad de plomo presente en el aceite usado oscila del 1 al 1,5 % en peso y proviene de las gasolinas y de los aditivos.

Tabla N° 6 Composición de contaminantes presentes en los aceites residuales

Contaminantes	Concentración (ppm)
Cadmio	1,2
Cromo	1,8
Plomo	220
Zinc	640
Cloro Total	900
PCB's	< 2

Fuente: Resultado obtenido de estudio realizado en Uruguay, 2005

Tabla N° 7 Características fisicoquímicas de los aceites usados

CARCTERÍSTICAS	AUTOMOTOR	INDUSTRIAL
Viscosidad a 40°C, SSU	97 - 120	143 - 330
Gravedad 15,6 °C, ° API	19 - 22	25,7 – 26,2
Peso Específico a 15,6 °C	0,9396 – 0,8992	0,9002 – 0,8972
Agua, % Vol.	0,2 -33,8	0,1- 4,6
Sedimentos, % Vol.	0,1 – 4,2	0
Insolubles en Benceno, %Peso	0,56 – 33,3	0
Solubles en gasolina, % Vol.	2,0 – 9,7	0
Punto de ignición, °C	78 – 220	157 -179
Poder Calorífico, MJ/Kg	31560 - 44880	40120 - 41840

Fuente: Manejo ambientalmente adecuado para los desechos aceitosos, Colombia.

1.8.2 Distintas posibilidades y reusos

- ✓ Una opción ambientalmente aceptable de uso del aceite desechado es como ***combustible en hornos*** de cemento y cal, en hornos de ladrillo, u hornos metalúrgicos. Debido a la alta temperatura de combustión y las propiedades de absorción del cemento, cal y arcilla, los hidrocarburos peligrosos se destruyen y los metales pesados, azufre y cloruros son absorbidos. Los posibles efectos de contaminación del aire se ven minimizados con sofisticados sistemas de limpieza de gas, con que cuentan las plantas modernas.
- ✓ Los aceites usados provenientes de motores también pueden ser utilizados como ***combustible para diferentes aplicaciones***. En estos casos, el aceite usado se mezcla con aceite negro (aceite de alquitrán, aceite de carbonera) (por ej., panaderías), carbón de leña/ polvo de carbón mineral (hornos de cal) o pedazos de hule de llantas usadas (vehículos que producen asfalto).
- ✓ El aceite usado de refinería se puede usar como ***combustible para la calefacción y generación de energía***.
- ✓ Otro método sencillo para aprovechar el aceite usado de motores es ***la producción de grasa*** para la fabricación de jabón. El aceite refinado se puede procesar adicionalmente para obtener grasa. Para ello el aceite se mezcla con estearato de sodio o calcio en recipientes de agitación caliente. El aceite usado se agrega al jabón terminado mientras que este está aún caliente y suave, en una proporción de 20% de jabón a 80% de aceite usado.
- ✓ El aceite usado de motores también se utiliza como agente protector de madera. Los postes de cercas, por ejemplo, se remojan con aceite usado para tornarlos resistentes contra el ataque de las termitas.
- ✓ En cuanto a la ***incineración***, esta vía destructiva se utiliza sobre todo cuando se comprueba la imposibilidad de reutilización debido a la presencia de ciertos tipos y niveles de contaminantes nocivos. Es el caso, por ejemplo, de la presencia de PCB, que sólo se destruyen satisfactoriamente mediante este proceso.

1.8.3 Efectos ambientales de los residuos de combustión de aceites usados

1.8.3.1 Contaminación del aire

La eliminación del aceite usado por combustión solo o mezclado con fuel-oil, también origina graves problemas de contaminación ^[16], a menos que se adopten severas medidas para depurar los gases resultantes.

Los compuestos de cloro, fósforo, azufre, presentes en el aceite usado dan gases de combustión tóxicos que deben ser depurados por vía húmeda.

Otro gran problema asociado al anterior lo crea el plomo que emitido al aire en partículas de tamaño submicrónico perjudica la salud de los seres humanos, sobre todo de los niños. El plomo es el más volátil de los componentes metálicos que forman las cenizas de los aceites usados, por lo que puede afirmarse que, prácticamente, cuando se quema aceite todo el plomo es emitido por las chimeneas.

La cantidad de plomo presente en el aceite usado oscila del 1 al 1,5 % en peso y proviene de las gasolinas y de los aditivos. Estudios realizados en los Países Bajos han estimado que si llegaran a quemarse las 70.000 toneladas año de aceite usado que pueden recogerse, se recargaría la atmósfera con 350 toneladas adicionales de plomo, lo que representaría una tercera parte más de lo que actualmente emiten los escapes de los vehículos.

Por tanto, las instalaciones donde haya de quemarse aceite usado deberán estar dotados de un eficaz, pero muy costoso sistema depurador de gases. De lo contrario, antes de su combustión deberá someterse al aceite usado a un tratamiento químico de refinado para eliminar previamente sus contaminantes, pero entonces el aceite que se obtiene es preferible, desde el punto de vista económico, utilizarlo para ser regenerado.

Si optamos por quemar una lata de 5 litros de aceite usado, sola o con fuel, emitiríamos una contaminación atmosférica a través de la combustión incontrolada de los mismos, debido a que los componentes de metales, cloro, que contienen producen gases tóxicos que deben ser depurados que contaminarían un volumen de aire equivalente al que respira un adulto a lo largo de 3 años de su vida.

Por tanto, las instalaciones donde haya de quemarse aceite usado deberán estar dotados de un eficaz, pero muy costoso sistema depurador de gases o antes de su combustión deberá

[16] Contaminación por la combustión de aceites usados

<http://www.euskalnet.net/depuroilsa/Riesgosmedioambiente.html>

someterse al aceite usado a un tratamiento químico de refinado para eliminar previamente sus contaminantes.

1.8.3.2 Riesgos a la salud

- ✓ **Gases:** que contienen aldehídos, cetonas, compuestos aromáticos, CO₂ son irritantes y actúan sobre el tejido respiratorio superior, ahogos, asma, bronquitis, efectos mutantes, cáncer.
- ✓ **Elementos:** como Cl, Sb, Cr, Ni, Cd, Mn, Cu, actúan sobre el tejido respiratorio superior y tejido pulmonar.
- ✓ **Otros compuestos:** como CO, NO₂, disolventes halogenados, SH₂ producen:
- ✓ efectos asfixiantes, impiden el transporte de oxígeno y por tanto la respiración de la célula.
- ✓ **Metales:** como Pb, Cd, Mn, tienen efectos tóxicos sobre el riñón, el cadmio además efectos cancerígenos sobre la próstata y el cromo sobre el pulmón.
- ✓ **Compuestos aromáticos:** como tolueno, benceno, pueden llegar a provocar leucemias, otros hidrocarburos más ligeros se acumulan en la sangre y podrían llegar a producir parálisis.

1.8.4 Estudio del aceite usado como combustible

Para disminuir la emisión de gases contaminantes producto de la combustión de los aceites residuales se tendrá en cuenta:

1.8.5 La regeneración

Mediante distintos tratamientos es posible la recuperación material de las bases lubricantes presentes en el aceite original, de manera que resulten aptas para su reformulación y utilización. Casi todos los aceites usados son regenerables, aunque en la práctica la dificultad y el costo hacen inviable esta alternativa para aceites usados con alto contenido de aceites vegetales, aceites sintéticos, agua y sólidos ^[17].

1.8.5.1 Tecnologías de regeneración

A continuación se resumen las tecnologías más comúnmente utilizadas para la regeneración de los aceites usados.

➤ **Ácido – Arcilla**

El aceite se somete a evaporación de aquellos productos ligeros como agua e hidrocarburos del rango de la gasolina. Luego se trata con ácido sulfúrico y se filtra con arcilla y cal para mejorar su color y su acidez. En la siguiente etapa el aceite se fracciona para separar destilados livianos del tipo gas-oil y así obtener finalmente la base lubricante. El proceso tiene un rendimiento global del 70% en peso de la carga de aceite. Sin embargo la desventaja es que se genera un residuo de la arcilla ácida y aceite de difícil disposición final.

➤ **Destilación a vacío – arcilla**

El aceite se destila a presión por debajo de la atmosférica, lo que permite operar a bajas temperaturas reduciendo los problemas de descomposición. Se utiliza la arcilla con alta capacidad adsorbente para reducir las impurezas, fundamentalmente los metales pesados.

La desventaja de este proceso es la generación del residuo de la arcilla con aceite.

➤ **Destilación en vacío e hidro-tratamiento**

El aceite usado es deshidratado y son eliminados parte de los hidrocarburos livianos, luego el aceite se envía a una torre de destilación a vacío, donde se extraen por la cabeza los componentes livianos remanentes, quedando en el fondo los contaminantes pesados. Los productos livianos separados pueden ser usados como combustibles. El fondo contiene metales, productos de polimerización y materiales asfálticos. La desventaja es que la tecnología de este proceso resulta costosa.

1.8.6 La valorización energética

El aceite usado mezclado con fuel-oil (en calderas industriales y hornos de cemento) ya sea por combustión directa o con pre-tratamiento del aceite (separación de agua y sedimentos). El aceite se constituye en uno de los residuos con mayor potencial para ser empleado como combustible por su elevado poder calorífico. Aunque la mayoría de calderas domésticas, calderas comerciales e industriales de baja potencia de generación, pueden quemar aceites usados, es una práctica no recomendable debido al problema de contaminación potencial del aire, por tratarse de quemas de productos sin control de especificaciones, quemado bajo

condiciones no controladas y sin tratamiento de emisiones, especialmente por el contenido de metales pesados.

1.8.6.1 Pretratamiento de los aceites usados

Sin embargo, la transformación del aceite usado a energético, requiere la aplicación de un tratamiento tendiente a adecuar las condiciones del aceite a las características propias del proceso de combustión, consistente básicamente en la aplicación de dos etapas así:

- a)** Adecuación del aceite usado mediante procesos de filtración para retirar partículas gruesas.
- b)** Remoción de partículas finas, mediante procesos de sedimentación y centrifugación.

Estas etapas involucran la adición de desemulsificantes, para el rompimiento de las emulsiones formadas con el agua. Una vez recuperadas las características del aceite, con el fin de lograr un combustible limpio de contaminantes, podrá utilizarse como energético en mezclas simples, de acuerdo con proporciones establecidas. Luego de realizada la operación de separación, se origina un desecho o lodo con alto contenido de metales pesados, el cual debe ser dispuesto de forma tal que asegure de cualquier manera que estos metales no serán absorbidos por los seres vivos.

La búsqueda de información sobre el tema y las prácticas comunes de países donde se utilizan los aceites usados tratados, llevó a establecer 4 opciones posibles para tratar estos lodos, así:

- Incineración
- Encapsulamiento en clinker
- Vitricación o ceramizado
- Relleno en las vías durante la elaboración de capa asfáltica.

Evaluadas estas cuatro posibilidades, la alternativa más adecuada para la disposición de lodos es el encapsulamiento en clinker para la producción de cemento; industria que ha mostrado un constante interés en participar en este tipo de investigaciones y de hecho en algunas plantas se han realizados algunas pruebas.

Se identifica igualmente, la cantidad de contaminantes presentes en los aceites usados y las concentraciones residuales de estos, una vez el aceite usado ha sido sometido a tratamiento de centrifugación (óptimo para separación de partículas finas), instante en el cual deja de ser un residuo peligroso, para convertirse en una opción que puede ser aprovechada.

Una vez que el residuo es transformado, puede producir distintos combustibles industriales al mezclarse con los energéticos tradicionales y comúnmente empleados en la industria en general.

Tabla N° 8 Concentración de contaminantes durante el tratamiento de aceite usado

CONTAMINANTES	ANTES	DESPUÉS
Cloro, % W	0,17 – 0,47	0
S, % W	0,17 – 1,09	0
Zn, ppm	260 – 1787	Trazas
Ca, ppm	211 - 2291	Trazas
Ba, ppm	9 – 3906	Trazas
P, ppm	319 – 1550	0
Pb, ppm	85 - 21676	Trazas
Al, ppm	0,6 – 758	0
Fe, ppm	97 - 2411	Trazas

Fuente: Proyecto de regeneración y aprovechamiento de aceites usados, España, 2006

CAPÍTULO II

PARTE

EXPERIMENTAL

CAPÍTULO II

2 PARTE EXPERIMENTAL

Para efectuar y desarrollar la parte experimental fue necesario llevar a cabo análisis específicos en cuanto a la calidad de materia prima, piedra caliza, y del producto de calcinación de la misma, como es la cal viva (CaO). Además de que también se consideró relevante caracterizar algunos parámetros fisicoquímicos en el combustible empleado, aceite lubricante de automotores usado. Y de gran importancia, se especifica resultados de análisis determinados con anterioridad realizados en la planta de cal, como referencia y aporte para el desarrollo de este proyecto de investigación, concernientes a la determinación de gases contaminantes de la fuente fija de combustión, y de resultados de la caracterización del aceite quemado respecto a metales pesados presentes en este.

2.1 MUESTREO

Para proceder a efectuar el correspondiente muestreo se ha tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- En razón de que la materia prima utilizada en las 22 caleras que conforman la Corporación “Los Nevados”, emplean la misma piedra caliza, proveniente de dos minas como son Ganquis y Shobol, siendo importante mencionar que en la actualidad se está procesando la caliza de Ganquis, por facilidad de adquisición, se decide analizar la materia prima de una sola calera.
- De igual forma en vista de que el aceite quemado empleado como combustible para la calcinación de la piedra caliza en los hornos verticales, en cada una de las caleras, es de características similares, en razón de que procede de la recepción y recolección simultanea de diversos sitios como lubricadoras de automotores, mecánicas, etc., del cantón Riobamba y de Ambato en tambores de 50 galones, para

la caracterización de éste se decide realizarlo en el punto de entrada al quemador en un sistema de combustión elegido con anterioridad.

- Además luego de la visita a algunas plantas de cal que conforman la Corporación se pudo constatar de que el sistema de combustión que se llevan a cabo para la obtención de cal viva, presenta semejanzas, en cuanto a las condiciones de operación y producción, se tomó como unidad modelo a una específica calera, siendo ésta la planta Caleras del Pacífico, para efectuar todos los estudios necesarios para el desarrollo del presente proyecto.

2.1.1 Muestreo de Piedra Caliza

El muestreo de la piedra caliza procesada en la planta de cal “Caleras del Pacífico”, se efectuó en las pilas de almacenamiento, que no cuentan con una cubierta, y que se encuentran cerca a la parte superior del horno vertical, a unos cuantos metros del punto de carga del mismo.

- Se tomó tres muestras simples de cada pila de diferentes puntos de la misma, cada una con aproximadamente 2 kg de piedra caliza, obteniendo un resultado de tres muestras de la caliza de Ganquis (piedra grisácea), y tres muestras de la de Shobol (piedra amarillenta).
- Se verificó que las muestras de piedra caliza no presenten exceso de humedad y que las características físicas visuales tengan diversidad, siendo muestras representativas del lote.
- Las muestras fueron recogidas en bolsas herméticas, un día antes del análisis fisicoquímico, previamente codificadas con el lugar de recolección, fecha, nombre y número de muestra.

2.1.2 Muestreo de Cal Viva

Las muestras de cal viva fueron recogidas en el punto de descarga del horno, en las pilas de almacenamiento de cal viva (sin moler) donde el material se encontraba completamente distribuido previo a la hidratación y del material de cal viva molido.

- En la descarga del horno se recogió una muestra de aproximadamente 2,5 kg, en la parte superficial de la descarga que tenía temperatura inferior a la del interior del punto de descarga.
- En las pilas de almacenamiento de cal viva (sin moler), se tomó dos muestras de aproximadamente 2,5kg, representativa, de diferentes puntos, superior, medio e inferior de la pila.
- Finalmente se tomó una muestra de aproximadamente 10 kg de cal viva molida, siendo esta previamente cuarteada y homogeneizada para su recolección.

Todas las muestras fueron codificadas con el nombre y número de muestra, lugar de recolección y fecha, además de que se recolectaron en fundas de cierre hermético, para evitar la entrada de la humedad y que estas se puedan hidratar en un tiempo prolongado a la exposición con el ambiente.

2.1.3 Muestreo del Combustible: Aceite quemado (residual de automotores)

El aceite quemado empleado como combustible para el tratamiento de la piedra caliza en la obtención de cal en el horno vertical, en razón de que contiene agua, se realiza una deshidratación antes de ingresar al quemador, sin embargo el agua se encuentra en emulsión y no es completamente retirada. Entonces el punto de muestreo del combustible es antes de la entrada del quemador, luego de la deshidratación, de la parte superior del tanque dosificador, donde la temperatura de éste, se encuentra a unos 60 °C aproximadamente.

Es importante mencionar que los análisis fisicoquímicos del combustible se realizaron en laboratorio DPEC de la Universal Central del Ecuador - Fac. de Ing. Química.

De forma resumida se menciona el procedimiento para la recolección de la muestra del combustible.

- Se drenó el combustible en un recipiente, durante unos 2 min, para que la tubería alcance la del combustible. Luego se devuelve el aceite quemado al tanque de almacenamiento principal.

- Se recogió la muestra líquida en dos recipientes plásticos de 1,5 litros de volumen, limpios y completamente secos, se agitó cada una de ellas, y se cerró el recipiente asegurando de que no existan fugas.
- Se etiquetó, y codificó cada muestra del mismo lote, con el nombre, fuente de procedencia, fecha, tipo de empresa, temperatura de la muestra y nombre del recolector.

2.2 METODOLOGIA DE TRABAJO

La metodología de trabajo de acuerdo a los objetivos planteados se fundamentó en la aplicación de algunos tipos de investigación tales como la exploratoria y evaluativa.

De esta forma para lograr el primer nivel investigativo se realizó el análisis de la materia prima, piedra caliza, y del producto de la calcinación, cal viva, esto con el objeto de establecer las condiciones de calidad de las mismas, de igual manera se hizo una exploración en cuanto a las características básicas del combustible, y la investigación de los gases de combustión producidos, además de la determinación experimental de la medición de variables de proceso. Durante esta etapa de investigación se tuvo una idea específica de las condiciones actuales del sistema de combustión.

En la etapa evaluativa se analizó el diagnóstico de los aspectos anteriormente mencionados y se propusieron alternativas fundamentadas en las causas que afectan la eficiencia del proceso, para mejorar la calidad del producto obtenido, las condiciones de operación, y minimizar los gases de combustión.

Así para determinar la realidad de los factores críticos relacionados en la combustión se empleó diversos métodos y técnicas de análisis descritos a continuación.

2.2.1 MÉTODOS Y TÉCNICAS

Los métodos y técnicas empleados para el desarrollo de esta investigación se llevaron a cabo in situ, y en el laboratorio, en función del objetivo del análisis.

2.2.1.1 MÉTODOS

Tabla N° 9 Descripción de los métodos empleados en función del objetivo de análisis

Objetivo de Análisis: Determinación de calidad de piedra caliza y cal viva.		
Determinación	Método de Análisis	Alcance
Pérdidas por calcinación	Gravimétrico	Se determina el material volátil presente en la muestra específicamente CO ₂ y H ₂ O
CaCO ₃ totales	Volumétrico	Determina el % de carbonatos totales contenido en la muestra.
SiO ₂	Gravimétrico	Determina el %SiO ₂ existente en la muestra a analizar mediante diferencia de pesos.
Fe ₂ O ₃	Volumétrico	Determina el % Fe ₂ O ₃ existente en la muestra a analizar mediante titulación-valoración.
Al ₂ O ₃	Volumétrico	Determina el %Al ₂ O ₃ existente en la muestra a analizar mediante titulación-valoración.
CaO	Volumétrico	Determina el % CaO existente en la muestra a analizar mediante titulación-valoración.
Composición Química	Espectroscopía	Obtiene el contenido en % de principales compuestos presentes en una determinada muestra por espectroscopía de Rx.
Tamaño de partícula	Granulometría	Especifica la finura de partícula de una muestra sólida mediante tamización en determinados tamices.
Densidad relativa	Gravimétrica-volumétrica	Proporciona la densidad (g/cm ³) de una muestra sólida mediante la relación

		peso-volumen desplazado.
Objetivo de Análisis: Caracterización del aceite quemado.		
Determinación	Método de Análisis	Alcance
Densidad API		Determina la densidad del hidrocarburo corregida a 60°C, mediante el uso de un densímetro calibrado.
Contenido de Azufre	Espectroscopía	Determina el % en peso de azufre presente en la muestra.
Sedimento Básico y agua, BSW	Centrifugación	Proporciona el % de agua libre y sólidos, emulsión y mediante la adición de demulsificante el % de parafinas presentes en la muestra.
Sedimento por extracción	Evaporación	Determina el % de sólidos o sedimento contenido en la muestra por evaporación del componente volátil de la muestra.
Agua por destilación	Destilación	Especifica la cantidad porcentual de agua contenida en la muestra por evaporación del compuesto volátil (xileno o tolueno) a una temperatura menor a la de ebullición del agua.
Viscosidad		Proporciona la viscosidad de la muestra en cSt, mediante la relación de la constante del viscosímetro empleado y el tiempo de avance del fluido en cada punto graduado del viscosímetro.

Fuente: Autor

2.2.1.2 TÉCNICAS

2.2.1.2.1 Técnicas para la determinación de parámetros físico químicos de la piedra caliza y de la cal

2.2.1.2.1.1 Determinación de Pérdidas por calcinación (CO_2 y H_2O)

Equipo necesario

- ✓ Balanza analítica
- ✓ Mufla
- ✓ Crisol
- ✓ Desecador
- ✓ Espátula
- ✓ Pincel
- ✓ Pinza de metal

Procedimiento

- 1.- Pesar 1 g de muestra sobre el crisol tarado y pesado.
- 2.- Calcinar por treinta minutos en la mufla a 1 000 °C.
- 3.- Sacar, dejar enfriar el crisol en el desecador por 20 minutos.
- 4.- Pesar el crisol con la muestra calcinada.
- 5.- Calcular el porcentaje de pérdida por calcinación.

$$\%PPC = (\text{peso crisol más muestra} - \text{peso crisol más muestra calcinada}) * 100$$

2.2.1.2.1.2 Determinación de la composición química de caliza y cal viva por espectroscopía

Materiales y equipos

- Trituradora de Mandíbula MSI
- Pulverizador BICO
- Plato Caliente Thermo Scientific Type 2200

- Prensa HERZOG
- Espectrómetro de rayos X Siemens SRS 3000
- Palas de metal
- Fundas Plásticas

Procedimiento

- Realizar la molienda de la muestra de caliza y de cal viva y desechar las partículas de mayor tamaño.
- Tomar la muestra molida e introducir en el pulverizador, y presionar la carga hasta pulverizar toda la muestra añadida.
- Recepar el material pulverizado en una pala metálica y llevarla al plato térmico para descartar la humedad contenida en la muestra.
- Prensar la muestra libre de humedad obteniendo su correspondiente pastilla, y codificarla.
- Colocar cada pastilla en posición ordenada dentro del espectrómetro de rX.
- Correr el programa automatizado del equipo e iniciar la medición previa la identificación de las muestras en sus respectivas posiciones.
- Esperar de 10-15min mientras dura el proceso de medición, y luego anotamos los resultados obtenidos en porcentaje de cada componente.

2.2.1.2.1.3 Determinación de Carbonatos Totales

Materiales y Equipos

- Matraz de 250ml
- Bureta de 50ml
- Plato Caliente Thermo Scientific Type 2200
- Balanza Analítica

Reactivos

- Solución HCl 0,5 N
- Solución NaOH 0,5 N
- Agua destilada

Procedimiento

- Pesar 1 g de la muestra pulverizada y libre de humedad.
- Trasvasar la muestra en el interior del matraz y añadir 20ml de HCl 0,5 N
- Calentar hasta conseguir la homogeneización de la muestra en el solvente.
- Enfriar la solución con agua destilada y añadir unas gotitas del indicador de fenolftaleína.
- Titular con NaOH 0,5 N hasta viraje, cambio de coloración de transparente a rosa pálido.
- Anotar el volumen de NaOH gastado y con este dato obtener el % de CaCO_3 en la tabla de determinación carbonatos totales especificado para éste método volumétrico.

2.2.1.2.1.4 Método gravimétrico y complexométrico para la determinación de óxidos de sílice, aluminio, hierro y calcio

EQUIPO

- Mufla de 1150 °C
- Crisoles de platino
- Vasos de diferentes medidas
- Matraces erlenmeyer
- Embudos
- Papel filtro para finos y medios
- Platos de calefacción (250°C)
- Buretas triple vía de 50 mL
- Pipetas de 50, 20 y 5 mL
- Frascos de vidrio y plástico
- pH-metro

REACTIVOS

- Acetato de amonio
- Ácido acético concentrado

- Ácido calconcarboxílico (indicador)
- Ácido clorhídrico concentrado
- Ácido sulfosalísilico (indicador)
- Amoníaco concentrado
- Complexon III (Titriplex III, EDTA)
- Hidróxido de potasio
- Pirilidazo-2-naftol (PAN indicador)
- Sulfato de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
- Trietanolamina

Procedimiento de preparación de la Muestra

- 1.- Lavar y secar bien un crisol de platino y llevar a la mufla a $1\,000^\circ\text{C}$ por 15 minutos
- 2.- Sacar y llevar al desecador hasta obtener peso constante
- 3.- Añadir 1 g de muestra fundente ($0,5\text{ g de Na}_2\text{CO}_3 + 0,5\text{ g de K}_2\text{CO}_3$) mezclar y homogenizar. Cubrir la muestra con 2 g de mezcla fundente.
- 4.- El crisol con la muestra fundir en el mechero fischer, luego colocar la tapa de platino e introducir en la mufla a $1\,000^\circ\text{C}$ por 30 minutos
- 5.- Sacar la muestra, enfriar violentamente en agua fría, la base del crisol, colocar el crisol en un plato ancho de porcelana previamente limpio
- 6.- Añadir lentamente 1 mL de agua destilada y 10 mL de ácido clorhídrico concentrado, con ayuda de una varilla de vidrio disgregar los grumos formados o pegados en el crisol
- 7.- Vaciar la muestra en el plato de porcelana lavando bien el crisol con la menor cantidad posible de agua caliente y seguir disgregando si es necesario los grumos formados
- 8.- Colocar el plato de porcelana en baño maría y evaporar a sequedad
- 9.- Disolver con 10 mL de HCl concentrado y 50 mL de agua destilada caliente, tratando de homogenizar la muestra, luego poner 10 minutos en baño maría

10.- Preparar el filtro, banda blanca para gruesos y un balón aforado de 250 mL. Filtrar cuidadosamente la muestra contenida en el plato de porcelana.

El filtrado recoger en el balón, lavando con agua destilada caliente, hasta que el residuo no dé reacción de cloruros con AgNO_3

Determinación de sílice

- Colocar en un crisol de platino (tarado y pesado)
- Calentar y quemar cuidadosamente el papel filtro (que no se forme llama) hasta coloración blanquecina (500 a 600°C) con la ayuda de un mechero Fisher.
- Calcinar por 30 minutos en una mufla a 1 000°C
- Enfriar en el desecador y pesar

$$\% \text{SiO}_2 = (\text{peso crisol} + \text{precipitado calcinado}) - \text{peso crisol vacío}) * 100$$

Determinación de óxido de hierro Fe_2O_3

- a.- Tomar 50 ml de alícuota de solución preparada
- b.- Determinar el pH de 1,5 a 1,7 con solución de amoníaco (controlar con pH-metro)
- c.- Agregar indicador ácido sulfosalísílico (0.5 a 0.8 g) hasta coloración violeta intenso
- d.- Calentar ligeramente la solución
- e.- Titular con EDTA (hasta cambio de coloración de violeta a amarillo)

$$\% \text{Fe}_2\text{O}_3 = 1.996 * \text{ml EDTA consumidos} * \text{factor EDTA}$$

Determinación de Óxido de Aluminio Al_2O_3

- a.- Tomar 50 ml de solución preparada
- b.- Determinar pH 3 con buffer de acetato de amonio
- c.- Agregar 10 ml de EDTA
- d.- Calentar hasta ebullición por 5 minutos

- e.- Agregar 5 a 6 gotas de indicador PAN
- f.- Titular con solución de Sulfato de Cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 0.05 M hasta cambio de coloración de amarillo a azul intenso.

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 = 1.275 * [(\text{ml EDTA total} - \text{ml EDTA Fe}_2\text{O}_3) * \text{factor EDTA}] - (\text{mL CuSO}_4 * f \text{ CuSO}_4)$$

Determinación de óxido de calcio

- a.- En un erlenmeyer agregar 20 mL de hidróxido de potasio al 20% (controlar que el pH sea menor a 12).
- b.- Agregar 5 ml de solución de trietanolamina al 20%
- c.- De la solución obtenida en el filtrado, tomar una alícuota de 20 mL
- d.- Agregar pocos mg de indicador ácido calconcarboxílico
- e.- Titular con EDTA 0.05 M hasta cambio de coloración de violeta a azul
- f.- El viraje también se lo puede realizar utilizando como indicador calceína, hasta cambio de coloración de anaranjado a rosado.

$$\% \text{CaO} = 3.505 * \text{mL EDTA} * \text{factor EDTA}$$

2.2.1.2.1.5 Determinación granulométrica de cal viva

Materiales y Equipos

- Tamices estandarizados para determinación granulométrica
- Equipo vibratorio
- Balanza analítica
- Brocha para tamizado

Procedimiento

- Escoger los tamices de menor dimensión de acuerdo al análisis visual de la muestra, limpiarlos y ordenarlos de forma descendente.
- Colocar los tamices en el equipo de vibración.
- Pesar 100 g de la muestra de cal viva molida (producto de despacho de Caleras del Pacífico).
- Esparcir la muestra sobre el primer tamiz y encender el quipo de vibración.

- Esperar cinco minutos, y retirar el primer tamiz.
- Pesar el contenido retenido en el tamiz y anotar el resultado.
- Repetir los tres ítems anteriores para cada tamiz siguiente hasta terminar con el peso del residuo.
- Elaborar una tabla con los valores obtenidos y representarlos gráficamente.

2.2.1.2.1.6 Determinación de la densidad relativa

Materiales y Equipos

- Matraz de Le Chatelier graduado de 24 cm³
- Balanza analítica
- Espátula
- Embudo plástico

Sustancias y reactivos

- Agua
- Alcohol etílico Absoluto

Procedimiento

- Llenar el matraz de Le Chatelier con alcohol etílico hasta el punto en el cuello situados entre las marcas 0 y 1cm³.
- Sumergir el matraz tapado para evitar la volatilidad del reactivo, en un recipiente con agua durante un intervalo de tiempo de 1 hora aproximadamente hasta obtener una estabilización del volumen de alcohol desnaturalizado.
- Registrar el volumen de alcohol luego de este permanecer constante y el peso total del matraz con el solvente.
- Pesar 50 g de muestra e introducirla poco a poco en el interior del matraz evitando su adherencia en las paredes.
- Una vez introducida la muestra tapar y sumergir el matraz en agua y esperar que el nivel del líquido alcance su posición final en algún punto de la serie superior de las graduaciones (en caso de no ascender el nivel añadir más muestra).
- Registrar el volumen final alcanzado y el peso final del matraz de Le Chatelier.

- Realizar el cálculo correspondiente de la densidad en función de la relación masa-volumen.

$$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{\Delta \text{Peso del matraz}}{\Delta \text{Volumen}}$$

2.2.1.2.2 Técnicas para la determinación de parámetros físico químicos del combustible: aceite lubricante residual de motores

2.2.1.2.2.1 Densidad API

- Colocar la muestra de combustible en una probeta.
- Introducir el densímetro y esperar 5-10 minutos.
- Leer el valor de la densidad observada y reportar.
- Medir la temperatura con la pistola láser (pirómetro) en el valor de la densidad API obtenida.

2.2.1.2.2.2 Contenido de Azufre

- Encender en el Equipo de Rayos X y esperar 30 min para su calibración.
- Colocamos la muestra del combustible en un porta muestra de plástico.
- Introducir la muestra y esperar aproximadamente de 15 a 20 minutos.
- Reportar el contenido de azufre obtenido.

2.2.1.2.2.3 Sedimento Básico y Agua, BSW

Materiales y equipos

- Centrifuga
- Tubos de centrifugación

Procedimiento

- Llenar con 100ml de solvente JP₁ los tubos de centrifugación y añadir aceite quemado hasta los 200.
- Centrifugar por cinco minutos, leer y reportar el % de agua libre.
- Agregar demulsificante de acción rápida se recomienda analizar de gota a gota.
- Agitar diez veces hasta conseguir la homogeneización.

- Colocar los tubos en la centrifuga de forma equilibrada por 5 min a una fuerza centrífuga relativa de 500 como mínimo y a una velocidad entre 1210 y 1710 rpm.
- Sacar los tubos y observar si existe una separación notoria de la interfase agua-aceite.
- En caso de existir emulsión agregar de 2 -4 gotitas más de demulsificante y volver a centrifugar.
- Leemos el resultado obtenido de BSW en porcentaje siempre y cuando la interfase agua y aceite no contenga emulsión.
- Reportar el % de agua libre, de emulsión y de BSW obtenido.

2.2.1.2.2.4 Sedimento por extracción

Equipo de extracción.

- Vaso erlenmeyer de 1000ml.
- Condensador de agua.
- Canastilla metálica.
- Copa de agua.
- Calentador.
- Dedal de cerámica poroso.

Procedimiento

- Pesar el dedal y tomar el peso inicial.
- Pesar el volumen de la muestra aproximadamente 10g.
- Colocar el dedal en la canastilla y colocar los 10g de muestra.
- Añadir al erlenmeyer 100ml de xileno.
- Encender el calentador de 300 a 400 C.
- Abrir la válvula del paso de agua para condensar.
- Esperar 30 minutos hasta que se limpie completamente el dedal y los sólidos queden en el fondo.

- Retirar de la fuente de calor.
- Sacar el dedal, en la estufa a 70 C durante 1 hora y pesar.
- Calcular el contenido de sólidos presentes en la muestra.

$$\% \text{masa} = (\text{masa de sedimento} / \text{masa de la muestra}) 100$$

2.2.1.2.2.5 Agua por destilación

Equipo de destilación

- Balón de 1000ml.
- Trampa de agua.
- Enfriador
- Condensador de agua.
- Manta eléctrica

Procedimiento

- Colocar 100ml de muestra del aceite quemado en el balón.
- Adicionar 100ml de solvente xileno o tolueno.
- Anadir 3 gotas de demulsificante de acción rápida (F-46).
- Agregar 3 gotas de antiparafinico.
- Suministrar una fuente de calor de 70 a 80 C.
- Abrir la válvula del paso de agua para condensar.
- Esperar de 45 a 60 minutos hasta recolectar el agua total en la trampa, contenida en la muestra.
- Apagar el equipo.
- Leer el resultado obtenido en porcentaje y reportar.

2.2.1.2.2.6 Viscosidad

- Succionar la muestra de aceite quemado en el capilar de determinado código, mediante una bomba de vacío y sellar el orificio de descarga para evitar el retorno del mismo.
- Luego introducimos el capilar en aceite mineral temperado estandarizada a una temperatura de 40 y luego a 80° F.

- Retirar el tapón alcanzada dicha temperatura y esperar que el crudo fluya por el capilar hasta la primera línea de aforamiento.
- Iniciar el cronómetro y medir el tiempo hasta alcanzar la segunda línea de aforo y anotar el tiempo en segundos.
- Medir el tiempo durante el cual fluye el crudo desde la segunda línea de aforo hasta la tercera y anotar este segundo tiempo en segundos.
- Realizar los cálculos y obtener una viscosidad promedio de los dos tiempos en cSt.
- Reportar la viscosidad obtenida.

2.3 DATOS EXPERIMENTALES

2.3.1 DATOS

2.3.1.1 *Análisis químico de la piedra caliza como materia prima y de la cal viva como producto de calcinación.*

Tabla N° 10 Análisis químico de materia prima y producto.

Muestra Composición	Caliza Ganquis	Caliza Shobol	Cal Viva
Ca CO₃ Totales(%)	83,75	97,75	99
PPC (%)	38,65	39,90	13,20
SiO₂(%)	10,32	4,85	23,70
Al₂O₃ (%)	1,53	1,34	1,62
Fe₂O₃ (%)	1,60	0,76	1,48
CaO(%)	47,05	52,46	58,88
MgO(%)	0,47	0,33	0,51
SO₃ (%)	0,12	0,11	0,33
Na₂O (%)	0,24	0,22	0,25
K₂O (%)	0,01	0,03	0,03
Total	100,00	100,00	100,00

Fuente: Autor

2.3.1.2 Análisis físico de la piedra caliza como materia prima y de la cal viva como producto de calcinación

Tabla N° 11 Determinación Granulométrica de Cal Viva

μm	N° de Tamiz	Peso retenido/tamiz (g)	% Retenido	% Acumulado Retenido	% Pasa/tamiz	% Acumulado Pasa
250	60	33,80	34,03	34,03	66,20	65,97
212	70	4,51	4,54	38,57	95,49	61,43
150	100	7,85	7,90	46,47	92,15	53,53
75	200	14,81	14,91	61,38	85,19	38,62
63	230	4,47	4,50	65,88	95,53	34,12
53	270	17,83	17,95	83,83	82,17	16,17
45	325	8,53	8,59	92,42	91,47	7,58
25,4	500	7,39	7,44	7,44	92,61	92,56
Residuo		0,14	0,14	100,00	99,86	0,00
Sumatoria		99,33				

Fuente: Autor

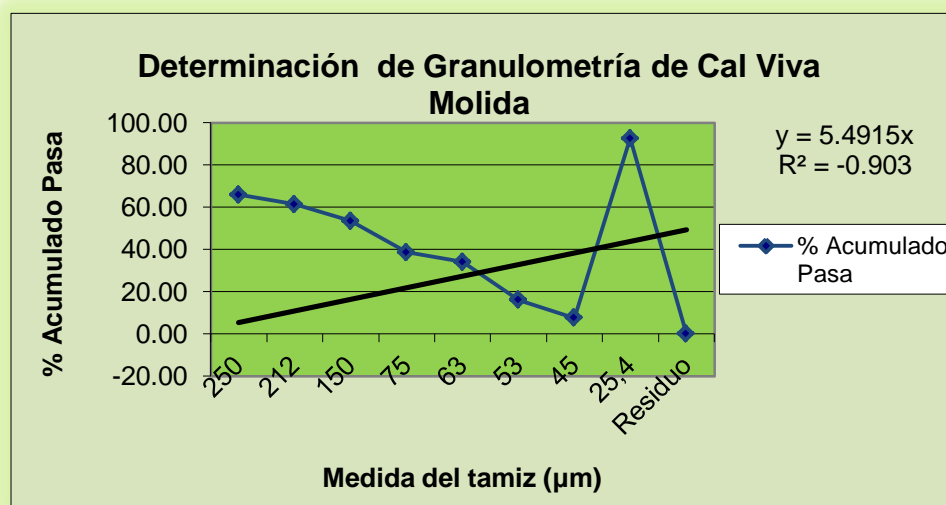


Grafico N° 1 Determinación Granulométrica de Cal Viva molida

Tabla N° 12 Densidad de caliza y cal viva

Muestra	Volumen inicial (cm³)	Volumen final (cm³)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	$\rho = \frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{g}{cm^3}$
Caliza Ganquis	0,6	19,4	344,7	394,7	2,66
Caliza Shobol	0,6	19,3	344,3	394,2	2,67
Cal Viva	0,7	21,8	345,6	411,00	3,09

Fuente: Autor

2.3.1.3 Caracterización del aceite lubricante usado utilizado como combustible para el horno de cal

Tabla N° 13 Caracterización del aceite lubricante usado

DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADOS
Densidad API a 60°F	°API	ASTM D 287	27,2
Azufre	%P	ASTM D 4294	0,5511
Sedimento Básico y Agua, BSW	%V	ASTM D 96	3,626
Sedimento por extracción	%P	ASTM D 474	0,060
Parafinas	%P	Interno	22,995
Agua por destilación	%V	ASTM D 95	3,6
Poder Calórico Neto	Kcal/Kg	Método Interno	9651
Viscosidad Cinemática a 40°C	cSt	PNE/DPEC/P ASTM D 445	91,79
Viscosidad Cinemática a 80°C	cSt	PNE/DPEC/P ASTM D 445	21,22

Fuente: Autor

2.4 DATOS ADICIONALES

2.4.1 Caracterización del aceite quemado

Tabla N° 14 Caracterización de contaminantes del aceite quemado

Tipo de Muestra: Aceite Usado de Motor			
Determinación	Unidades	Método	Resultado
Cenizas Sulfatadas	% masa	ASTM D 874-07	0,86
Nitrógeno	% masa	ASTM D 3228-08	0,05
Cadmio	ppm	ICP	0
Cromo	ppm	ICP	2
Plomo	ppm	ICP	30
Zinc	ppm	ICP	853
Calcio	ppm	ICP	1686
Bario	ppm	ICP	16
Fósforo	ppm	ICP	755
Aluminio	ppm	ICP	19
Silicio	ppm	ICP	56
Sodio	ppm	ICP	59
Potasio	ppm	ICP	5
Hierro	ppm	ICP	122
Cobre	ppm	ICP	23
Molibdeno	ppm	ICP	24

Fuente: Caleras del Pacífico

Tabla N° 15 Parámetros fisicoquímicos del aceite quemado

Parámetro	Unidad	Resultado	Método de Análisis
Densidad relativa 16 °C/16 °C	---	0,8877	ASTM D 1298
Punto de Inflamación	°C	164	INEN 808
Contenido de Agua	(%)V	4,2	ASTM D 95
Punto de Escurrimiento	°C	-27	ASTM D 97
Punto de Combustión	°C	217	INEN 808
Viscosidad Cinemática a 40°C	cSt	96,5	INEN 810
Viscosidad Cinemática a 100°C	cSt	12,68	INEN 810
Índice de Viscosidad	---	119,8	ASTM D 2270

Resultados de parámetros fisicoquímicos del aceite quemado realizados en la ESPOL

Fuente: Caleras del Pacífico

2.4.2 Análisis de gases de combustión

Tabla N° 16 Análisis In Situ de gases de combustión

Fuente fija de Combustión: Horno Fuel: Fueloil #2 Empresa: Caleras del Pacífico T ambiente: 27°C		
Parámetros	Resultado de la 1° Medición	Resultado de la 2° Medición
Oxígeno	6,87 %	7,15 %
CO ₂	10,55 %	10,34 %
CO	25 ppm	17 ppm
NO	6 ppm	4 ppm
NO ₂	1,5 ppm	0,9 ppm
NO _x	7 ppm	5 ppm
SO ₂	0 ppm	0 ppm
Ta	26	26,2
Eficiencia	84,5	84,0
Tf	224,4	232,5
Exceso de Aire	44,9	47,7

Fuente: Caleras del Pacífico (Laboratorio CESTTA)

Tabla N° 17 Primer análisis de gases de Combustión

Parámetros	Método/Norma	Unidad	Resultado	Valor Límite Permisible	Incertidumbre (k=2)
MP	PEE/LAB-CESTTA/59 EPA CRF 40PT 60 APÉNDICE A MÉTODO 5	mg/m ³	121,88	80	± 6%
SO₂	PEE/LAB-CESTTA/03 EPA-CTM-30 Celdas Electroquímicas	mg/m ³	3	800	± 7%
NO_x	PEE/LAB-CESTTA/03 EPA-CTM-30 Celdas Electroquímicas	mg/m ³	12	1400	± 15%
NO	PEE/LAB-CESTTA/03 EPA-CTM-30 Celdas Electroquímicas	mg/m ³	10	--	--
NO₂	PEE/LAB-CESTTA/03 EPA-CTM-30 Celdas Electroquímicas	mg/m ³	2	--	--
CO	PEE/LAB-CESTTA/03 EPA-CTM-30 Celdas Electroquímicas	mg/m ³	17	--	± 13%
COV's	PEE/LAB-CESTTA/51 Gas Cromatografía	mg/m ³	< 0,1	20	--
Benceno	PEE/LAB-CESTTA/51 Gas Cromatografía	mg/m ³	< 0,1	5	--
As	ABSORCIÓN ATÓMICA EPA SW-846 N°3050b, 7130	mg/m ³	< 0,05	0,8	--
Ni	ABSORCIÓN ATÓMICA EPA SW-846 N°3050b, 7130	mg/m ³	< 0,05	0,8	--
Mn	ABSORCIÓN ATÓMICA EPA SW-846 N°3050b, 7130	mg/m ³	0,01	0,8	--
Pb	ABSORCIÓN ATÓMICA	mg/m ³	1,63	0,8	--

	EPA SW-846 N°3050b, 7130				
Cr	ABSORCIÓN ATÓMICA EPA SW-846 N°3050b, 7130	mg/m ³	0,11	0,8	--
V	ABSORCIÓN ATÓMICA EPA SW-846 N°3050b, 7130	mg/m ³	< 0,05	0,8	--
Co	ABSORCIÓN ATÓMICA EPA SW-846 N°3050b, 7130	mg/m ³	< 0,05	0,8	--
Cu	ABSORCIÓN ATÓMICA EPA SW-846 N°3050b, 7130	mg/m ³	0,01	0,8	--
Cd	ABSORCIÓN ATÓMICA EPA SW-846 N°3050b, 7130	mg/m ³	< 0,05	0,08	--
Hg	ABSORCIÓN ATÓMICA EPA SW-846 N°3050b, 7130	mg/m ³	< 0,05	0,08	--

Fuente: Caleras del Pacífico- Laboratorio CESTTA

Tabla N° 18 Segundo análisis de gases de Combustión

Parámetros	Método/Norma	Unidad	Resultado	Valor Límite Permisible mg/m³	Incertidumbre (k=2)
MP	PEE/LAB-CESTTA/59 EPA CRF 40PT 60 APÉNDICE A MÉTODO 5	mg/m ³	137,14	80	± 5%
SO₂	PEE/LAB-CESTTA/03 EPA-CTM-30 Celdas Electroquímicas	ppm	15	800	± 28%

NO_x	PEE/LAB-CESTTA/03 EPA-CTM-30 Celdas Electroquímicas	ppm	73	1400	± 9%
NO	PEE/LAB-CESTTA/03 EPA-CTM-30 Celdas Electroquímicas	ppm	72	--	--
NO₂	PEE/LAB-CESTTA/03 EPA-CTM-30 Celdas Electroquímicas	ppm	0,3	--	--
CO	PEE/LAB-CESTTA/03 EPA-CTM-30 Celdas Electroquímicas	ppm	49	--	± 6%
COV's	PEE/LAB-CESTTA/51 Gas Cromatografía	mg/m ³	< 0,1	20	--
As	ABSORCIÓN ATÓMICA EPA SW-846 N°3050b, 7130	mg/m ³	< 0,05	0,8	--
Ni	ABSORCIÓN ATÓMICA EPA SW-846 N°3050b, 7130	mg/m ³	< 0,05	0,8	--
Mn	ABSORCIÓN ATÓMICA EPA SW-846 N°3050b, 7130	mg/m ³	0,04	0,8	--
Pb	ABSORCIÓN ATÓMICA EPA SW-846 N°3050b, 7130	mg/m ³	0,24	0,8	--
Cr	ABSORCIÓN ATÓMICA EPA SW-846 N°3050b, 7130	mg/m ³	0,03	0,8	--
V	ABSORCIÓN ATÓMICA EPA SW-846 N°3050b, 7130	mg/m ³	< 0,05	0,8	--
Co	ABSORCIÓN ATÓMICA EPA SW-846 N°3050b,	mg/m ³	< 0,05	0,8	--

	7130				
Cu	ABSORCIÓN ATÓMICA EPA SW-846 N°3050b, 7130	mg/m ³	0,01	0,8	--
Cd	ABSORCIÓN ATÓMICA EPA SW-846 N°3050b, 7130	mg/m ³	< 0,05	0,08	--
Hg	ABSORCIÓN ATÓMICA EPA SW-846 N°3050b, 7130	mg/m ³	< 0,05	0,08	--

Resultados del segundo análisis de gases de Combustión realizados con la adecuación de un recolector de material particulado (ciclón).

Medidos a condiciones normales, base seca, corregidos al 7 % de O₂ en volumen

Fuente: Caleras del Pacífico (CESTTA)

2.5 DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN

Para realizar un diagnóstico actual del sistema de combustión se analizó los resultados de los análisis llevados a cabo, además del monitoreo de las variables del proceso productivo, tomando como modelo de estudio la planta Caleras del Pacífico S.A., perteneciente a la Corporación Los Nevados, ubicada en la Avenida Leonidas Proaño, junto al Depósito de Coca-Cola, dentro de la zona urbana de la ciudad de Riobamba, Provincia de Chimborazo. De esta forma se estableció algunos tipos de diagnósticos complementarios para el estudio de Optimización del proceso de combustión.

2.5.1.1 Diagnóstico de las etapas de operación productiva

- **Trituración de la materia prima**

La producción de cal en esta planta y de similar forma en las demás, se la realiza de forma artesanal en lo que respecta al tratamiento previo de la materia prima, piedra caliza, es decir no se cuenta con una adecuada trituración primaria para la reducción del tamaño de la piedra antes de ser alimentada al horno, lo que resulta pérdida de tiempo de producción, en

razón de que se demora de 3-5 horas en picar manualmente la piedra y al mismo tiempo situarla en la banda transportadora al horno. Siendo de importancia mencionar además que dicha trituración manual arroja trozos de piedra entre 10 a 20 cm, debido a este tipo de operación.

- **Alimentación de la piedra caliza al horno**

Una vez triturada de forma manual, la piedra es llevada por una banda transportadora o por carretillas, hasta la parte superior del horno vertical, por donde es cargada, pasando la zona de precalcinación en donde la temperatura medida corresponde de 115 a 200 °C y llegando hasta la zona de calcinación. El problema es que la piedra no cae en una sola dirección y no se distribuye de forma homogénea sino hasta alcanzar un nivel de piedra caliza casi completo de la capacidad del horno, por lo que luego del descargue de aproximadamente casi toda la piedra caliza calcinada se empieza nuevamente a cargar el horno. Además cabe indicar que una pequeña fracción de las piedras que caen de la banda transportadora o dejadas por las carretillas se acumula en la parte exterior de la zona de alimentación.

- **Control del tiempo de calcinación y de temperatura.**

Una vez realizada la alimentación, ocupando el nivel de piedra caliza la mayor capacidad del horno, por acción de gravedad hace que la materia prima se ponga en contacto directo con la fuente de calor en el hogar de la zona de calcinación que fluctúa entre 1000 y 1250°C, (sin embargo alcanza los 1500°C), la cual es adecuada debido a que el tiempo de calcinación es reducido y la llama es suministrada en una sola dirección. Sin embargo se obtiene material crudo y en ocasiones cal quemada, cuya hidratación es lenta. Es importante decir que no se realiza un control o monitoreo constante de la temperatura, sino que basándose en la experiencia de producción y de acuerdo al tipo de caliza se espera un tiempo determinado y se procede a la descarga de cal viva. Así por ejemplo en el caso de la piedra procedente de Ganquis se espera una hora para la descarga del producto calcinado.

- **Descarga y almacenamiento de Cal Viva**

Una vez realizada la calcinación se procede a la descarga de cal viva producida, desde la zona de enfriamiento del horno hasta la abertura de descarga en la parte inferior del horno, cada hora, generalmente cuando se trata del tratamiento de caliza de Ganquis, y es llevada

en carretillas hasta el lugar de almacenamiento y depositada en pilas de este material granular esperando la disminución de temperatura de la cal viva para posteriormente ser hidratada. El tiempo de reposo de la piedra calcinada depende de la adecuación del lugar de almacenamiento. En este caso se espera de 1-3 horas, pues el lugar está en contacto con el aire del ambiente y se debe evitar que la cal viva absorba la humedad del mismo y pierda reactividad especialmente cuando se comercializa como cal viva.

En la transformación de cal viva a hidratada, el reposo es más prolongado, generalmente se hidrata cada lote de CaO producido y se realiza la molienda y tamizado en un lapso aproximado de 10 horas luego de la hidratación.

- **Tratamiento y alimentación del combustible.**

Una vez recolectado el aceite quemado en tambores de 50 galones proveniente de diferentes lubricadoras de la provincia de Chimborazo y Tungurahua. Estos son descargados, descartando el agua decantada en el tabor, en el tanque de almacenamiento del combustible situado cerca del punto de alimentación de la materia prima, elevado a unos 2 ½ m desde el hogar del horno.

En cuanto al tratamiento del combustible, no se realiza más que una deshidratación antes de ser alimentado al quemador para retirar una cierta cantidad del agua emulsionada, sin embargo no es tan efectiva. Además se debería considerar el contenido de sedimentos y realizar un pretratamiento un poco más sofisticado.

El sistema de alimentación del combustible es mediante tuberías de acero inoxidable y el transporte del fluido líquido es mediante el desplazamiento gradual por el flujo descendente del combustible desde el punto de descarga hasta su acumulación en un segundo tanque en donde se descarga por la parte inferior de éste el agua que aún persiste en el aceite lubricante usado, de este tanque de menor volumen se inyecta el combustible hasta el quemador a una temperatura de 60°C y con un contenido de agua aproximado de 3,6%. Luego el combustible se mezcla con el aire suministrado por el ventilador al quemador y produce la llama que mantiene la temperatura adecuada para la calcinación de la piedra caliza.

2.5.1.2 Diagnóstico de la materia prima de producción

Este diagnóstico tiene como objeto analizar las deficiencias del proceso de combustión relacionadas con la composición de la materia prima, tamaño del material granular destinado para la alimentación.

De acuerdo a la composición química de la piedra caliza de Ganquis, se trata de una caliza con un contenido de Carbonato de Calcio del 83,75% de baja pureza, que resulta que dicha piedra sea más resistente a la calcinación y que el tiempo de permanencia en el horno sea prolongado además de que las impurezas reduzcan la producción de cal viva y generen una cal de color grisáceo.

No así la piedra caliza de Shobol que resultaría la óptima materia prima para producción de productos calcáreos de calidad.

2.5.1.3 Diagnóstico de los gases de combustión

En el análisis de la concentración de los gases de combustión se realizó una comparación con los límites establecidos por el TULAS, en libro VI, anexo 3, y para la contaminación de los metales pesados y contaminantes emitidos se tomó como referencia dos fuentes: la primera de los límites de emisión establecidos por Ministerio del Ambiente en el Acuerdo 048 y la segunda de acuerdo a la tabla 3 del capítulo II perteneciente a la Resolución de la Ordenanza N°146 (*), expedida por la Dirección Metropolitana del Medioambiente del Municipio de Quito, para la combustión de desechos peligrosos y se realizó la corrección del límite de la emisión mediante la aplicación de la fórmula para corregir las emisiones de los gases: NO_x, CO, SO₂ y PTS (Partículas Totales Suspendidas) en base seca y a una referencia de O₂ (***Ver Anexo C***):

$$E_r = \frac{21\% - O_r}{21\% - O_m} \times E_m \quad \text{Ec. N° 2}$$

Donde:

Er = Emisión calculada al valor de referencia.

Em = Emisión medida de PTS, NO_x, CO y SO₂ en base seca.

Or = Nivel de referencia para el O₂.

Om = Valor medido para el O₂.

(*) La Ordenanza Metropolitana N° 146 determina la elaboración de Normas Técnicas de calidad ambiental y de emisión, descargas y vertidos que optimicen los procesos y permitan contar con la información necesaria para mejorar la gestión ambiental.

De esta forma se puede indicar que los gases de combustión correspondientes a Oxidos de Nitrógeno, Dióxido de Azufre, y Partículas totales se encuentran dentro del límite máximo permisible del TULAS, lo que evidencia, que no existe contaminación significativa de los mismos y por otro lado según el acuerdo 048 para las industrias cementeras todos a excepción del material particulado cumplen.

En lo que respecta a metales pesados como Arsénico, Selenio, Cobalto, Níquel, Telurio Cadmio y Talio Plomo, Antimonio, Cromo Total, Platino, Cobre, Vanadio, Zinc, Estaño, Manganeso, Paladio Mercurio cumple de acuerdo a la sumatoria del grupo de metales contaminantes.

Sin embargo la emisión de material particulado y de plomo es variable y ascendente, por lo que se debería dar una especial atención para minimizar la emisión de éstos contaminantes, en especial por su incumplimiento con los límites expuestos en el acuerdo 048.

2.5.1.4 Análisis Económico

A continuación se presenta un cuadro detallando los parámetros de costos de producción y de ventas de la microempresa Caleras del Pacífico con el objeto de determinar la rentabilidad de este proceso mediante la relación beneficio-costeo.

Tabla N° 19 Detalle general de los factores económicos implicados en la producción y venta de cal viva e hidratada.

COSTOS DE PRODUCCIÓN Y VENTAS				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (\$)	TOTAL (\$)
COSTOS ADMINISTRATIVOS Y PERSONAL				
SECRETARIA	SUELDO (\$)	1	380,00	380,00
OPERADORES POR TURNO A	JORNAL (\$/sacos diarios)	260	0,13	33,80
OPERADORES POR TURNO B	JORNAL (\$/sacos diarios)	260	0,13	33,80
JORNALERO (MOLIENDA)	JORNAL (\$/sacos diarios)	260	0,15	39,00
JORNALERO (ENVASADO)	JORNAL (\$/sacos diarios)	260	0,15	39,00
JEFE DE PRODUCCIÓN	SUELDO (\$)	1	800,00	800,00
GERENTE TÉCNICO	SUELDO (\$)	1	500,00	500,00

COSTOS OPERATIVOS				
ACEITE QUEMADO	GALÓN	50	0,50	25,00
PIEDRA CALIZA SHOBOL	m ³	4	16,25	65,00
PIEDRA CALIZA GANQUES	m ³	6	14,00	84,00
PIEDRA CALIZA CALERA	m ³	5	11,00	55,00
SERVICIOS BÁSICOS	\$/MES	1	100,00	100,00
COSTOS DE VENTA DE PRODUCTOS FINALES				
CAL VIVA MOLIDA	SACOS DE 25kg	70	4,10	287,00
CAL HIDRATADA MOLIDA (CAL-PAC 200 B)	SACOS DE 25kg	100	2,40	240,00
CAL HIDRATADA MOLIDA Y TAMIZADA (CAL-PAC 200 PLUS)	SACOS DE 25kg	90	3,25	292,50

Fuente: Caleras del Pacífico

Tabla N° 20 Detalle del costo de adquisición del combustible

ADQUISICIÓN DE ACEITE QUEMADO			
DESCRIPCIÓN	UNIDAD DE MEDIDA	NÚMERO DE UNIDADES	COSTO (\$)
VOLUMEN DE CADA TAMBOR	GALÓN	50	25
CANTIDAD SEMANAL	TAMBOR	30	750

Fuente: Caleras del Pacífico

Para la determinación de la relación beneficio-costo (BC) necesitamos el flujo total de los costos de producción, y de las ventas (especificado en el cuadro siguiente), y el valor se obtendrá de la relación:

$$BC = \frac{\text{Beneficio}(\$)}{\text{Costo}(\$)}$$

$$BC = \frac{19668,00\$}{9605,2\$} = 2,05$$

Lo que indica que por cada dólar invertido se recupera \$2,05. Obteniendo una ganancia neta de \$10062,80 al mes, determinando que la producción de cal es rentable.

Tabla N° 21 Costos totales de Producción y de Ventas, Valores de ganancia mensual y anual

COSTOS TOTALES DE PRODUCCIÓN Y VENTAS			
DESCRIPCIÓN	Total (\$)	Valor de Costo Mensual (\$)	Valor de Costo Anual (\$)
COSTOS ADMINISTRATIVOS Y PERSONAL			
SECRETARIA	380,00	380,00	4560,00
OPERADOR POR TURNO A	33,80	405,60	4867,20
OPERADOR POR TURNO B	33,80	405,60	4867,20
JORNALERO (MOLIENDA)	39,00	936,00	11232,00
JORNALERO (ENVASADO)	39,00	936,00	11232,00
JEFE DE PRODUCCIÓN	800,00	800,00	9600,00
GERENTE TÉCNICO	500,00	500,00	6000,00
SUBTOTAL	1825,60	4363,20	52358,40
COSTOS OPERATIVOS			
ACEITE QUEMADO	750	3000	36000,00
PIEDRA CALIZA SHOBOL	65,00	455	5460,00
PIEDRA CALIZA GANQUES	84,00	1512	18144,00
PIEDRA CALIZA CALERA	55,00	275	3300,00
SERVICIOS BÁSICOS	100,00	100	1200,00
SUBTOTAL	1054,00	5242,00	64104,00
SUMATORIA COSTOS DE PRODUCCIÓN		9605,20	116462,40
COSTOS DE VENTAS DE PRODUCTOS FINALES			
CAL VIVA MOLIDA	287,00	6888	82656,00
CAL HIDRATADA MOLIDA (CAL-PAC 200 B)	240,00	5760	69120,00
CAL HIDRATADA MOLIDA Y TAMIZADA (CAL-PAC 200 PLUS)	292,50	7020	84240,00
SUBTOTAL COSTOS DE VENTAS	819,50	19668,00	236016,00
GANANCIA NETA		10062,80	119553,60

Fuente: Autor

CAPÍTULO III

OPTIMIZACIÓN

DEL PROCESO

DE

COMBUSTIÓN

CAPITULO III

3 OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN

Para la optimización del proceso de combustión es importante tener en cuenta los factores críticos determinados en diagnóstico de la situación actual, de esta forma también será de prioridad cuantificar mediante cálculos de ingeniería algunas determinaciones concernientes al proceso de calcinación de la piedra caliza en el horno y producción de cal viva.

3.1 CÁLCULOS

3.1.1 BALANCES DE MASA Y ENERGÍA EN EL HORNO VERTICAL

3.1.1.1 BALANCE DE MASA

Para realizar el balance de masa se obtuvo de forma experimental los datos siguientes:

- % CaCO_3 (Ganquis)= 83,75%
- Flujo de piedra caliza= 180 qq/ día

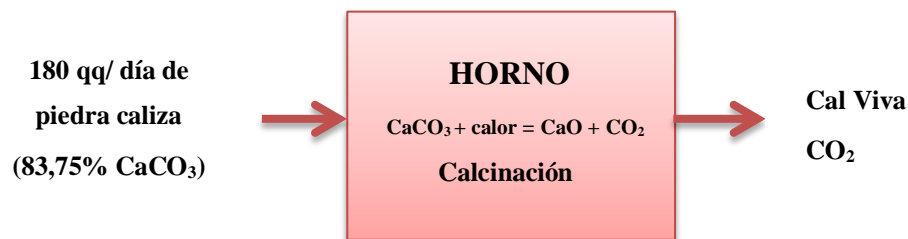


Figura N° 5 Balance de Masa

➤ Carga de piedra caliza por cada hora

$$180 \frac{\text{qq CaCO}_3}{\text{día}} \times \frac{100 \text{ lb}}{1 \text{ qq}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{2,205 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 340,14 \frac{\text{Kg piedra caliza}}{\text{h}}$$

➤ **Cantidad de CaCO_3 que reacciona durante la calcinación por hora**

$$340,14 \frac{\text{kg Ca CO}_3}{h} \times \frac{83,75 \text{ kg Ca CO}_3}{100 \text{ kg Ca CO}_3} = 284,87 \frac{\text{Kg Ca CO}_3}{h}$$

➤ **Flujo de Cal Viva obtenido**

$$340,14 \frac{\text{kg Ca CO}_3}{h} \times \frac{1 \text{ Kmol CaO}}{1 \text{ Kmol Ca CO}_3} \times \frac{1 \text{ Kmol Ca CO}_3}{100 \text{ kg Ca CO}_3} \times \frac{56 \text{ kg CaO}}{1 \text{ Kmol CaO}} = 190,48 \frac{\text{kg CaO}}{h}$$

- Tomando en cuenta la pureza de CaCO_3 de la piedra caliza

$$284,87 \frac{\text{kg Ca CO}_3}{h} \times \frac{1 \text{ Kmol CaO}}{1 \text{ Kmol Ca CO}_3} \times \frac{1 \text{ Kmol Ca CO}_3}{100 \text{ kg Ca CO}_3} \times \frac{56 \text{ kg CaO}}{1 \text{ Kmol CaO}} = 159,53 \frac{\text{kg CaO}}{h}$$

➤ **Flujo de CO_2 desprendido**

$$340,14 \frac{\text{kg Ca CO}_3}{h} \times \frac{1 \text{ Kmol CO}_2}{1 \text{ Kmol Ca CO}_3} \times \frac{1 \text{ Kmol Ca CO}_3}{100 \text{ kg Ca CO}_3} \times \frac{44 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ Kmol CO}_2} = 149,66 \frac{\text{kg CO}_2}{h}$$

- Tomando en cuenta la pureza de CaCO_3 de la piedra caliza

$$284,87 \frac{\text{kg Ca CO}_3}{h} \times \frac{1 \text{ Kmol CaO}}{1 \text{ Kmol Ca CO}_3} \times \frac{1 \text{ Kmol Ca CO}_3}{100 \text{ kg Ca CO}_3} \times \frac{44 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ Kmol CO}_2} = 125,34 \frac{\text{kg CO}_2}{h}$$

3.1.1.1.1 Capacidad de Producción de Cal Viva Diaria

Consideramos la reacción de calcinación del Carbonato de Calcio:

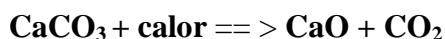


Tabla N° 22 Pesos moleculares de los compuestos químicos de la reacción de calcinación de la caliza

Compuesto Químico	Peso Molecular (Kg/Kmol)
CaCO_3	100
CaO	56
CO_2	44

Fuente: PERRY R. Manual del Ingeniero Químico

Según la relación estequiometria calculamos el factor de carga de material:

$$f = \frac{100 \text{ kg CaCO}_3}{56 \text{ kg CaO}} = 1,786 \frac{\text{kg CaCO}_3}{\text{kg CaO}}$$

$$CP = C_{prod.} \times f \quad \text{Ec. N}^\circ 3$$

Donde:

CP= Capacidad del proceso (Kg de Piedra Caliza CaCO_3)

C_{prod.}= Capacidad de Producción (Kg de Cal viva CO)

f = Factor de carga de material

$$C_{prod.} = \frac{CP}{f}$$

$$C_{prod.} = \frac{6836,88 \frac{\text{kg CaCO}_3}{\text{kg CaO}}}{1,786 \frac{\text{kg CaCO}_3}{\text{kg CaO}}}$$

$$C_{prod.} = 3828,04 \text{ kg CaO}$$

3.1.1.2 BALANCE DE ENERGÍA



Figura N° 6 Flujos de Calor en el horno

3.1.1.2.1 Cálculo de Calor útil necesario para la disociación de CaCO_3

$$\Delta H_{\text{reacción}} = \Delta H_{\text{formación de productos}} - \Delta H_{\text{formación de reactivos}} \quad \text{Ec. N° 4}$$

Tabla N° 23 Entalpías de Formación de los compuestos químicos de la reacción de calcinación de la caliza

Compuesto Químico	Entalpía de Formación (Kcal/mol)
CaCO_3	-289,5
CaO	-151,7
CO_2	-94,054

Fuente: PERRY R. Manual del Ingeniero Químico

$$\Delta H_{\text{reacción}} = [(H_{\text{formación CaO}} + H_{\text{formación CO}_2}) - H_{\text{formación CaCO}_3}] \text{ Kcal/mol}$$

$$\Delta H_{\text{reacción}} = \{[-151,7 + (-94,054)] - (-289,5)\} \text{ Kcal/mol}$$

$$\Delta H_{\text{reacción}} = (-245,754 + 289,5) \text{ Kcal/mol}$$

$$\Delta H_{\text{reacción}} = 43,746 \text{ Kcal/mol}$$

Entonces el calor mínimo necesario para la disociación es:

$$Q_{\text{mín}} = 43,746 \frac{\text{Kcal}}{\text{mol}} \times \frac{1 \text{ Kmol CaO}}{56 \text{ Kg CaO}} \times \frac{1000 \text{ mol}}{1 \text{ Kmol}}$$

$$Q_{\text{mín}} = 781,18 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg CaO}}$$

Y el flujo de calor útil necesario para la producción de $159,53 \frac{\text{kg CaO}}{\text{h}}$ será:

$$\dot{Q}_{\text{útil}} = 781,18 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg CaO}} \times 159,53 \frac{\text{kg CaO}}{\text{h}}$$

$$\dot{Q}_{\text{útil}} = 124621,65 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

3.1.1.2.2 Determinación del flujo de calor aportado por el combustible para el proceso de calcinación de la piedra caliza en el horno

- Cálculo de la cantidad de combustible necesario para la combustión durante un día.

$$Volumen = L \left\{ r^2 \left[\arccos \left(1 - \frac{h}{r} \right) \right] + (h - r) \sqrt{h(2r - h)} \right\} \text{ Ec. N° 5}$$

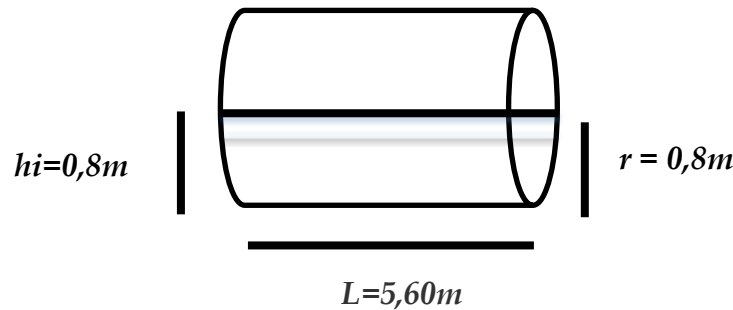
Siendo:

L: longitud del cilindro; y

h: altura del líquido

r: radio del cilindro

Determinación del Volumen inicial



$$Volumen = L \left\{ r^2 \left[\arccos \left(1 - \frac{hi}{r} \right) \right] + (hi - r) \sqrt{hi(2r - hi)} \right\}$$

$$Volumen = 5,60m \left\{ (0,8)^2 m^2 \left[\arccos \left(1 - \frac{0,8m}{0,8m} \right) \right] + (0,8 - 0,8)m \sqrt{0,8m(2(0,8m) - 0,8m)} \right\}$$

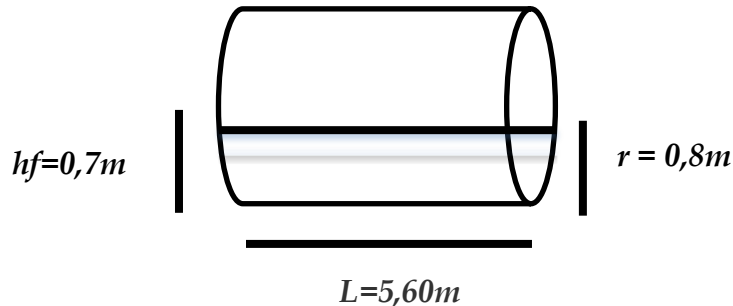
$$Volumen = 5,60m \left\{ 0,64m^2 [\arccos(0)] + (0)m \sqrt{0,64m^2} \right\}$$

$$Volumen = 5,60m \{ 0,64m^2 [1,571] + (0) \}$$

$$Volumen = 5,60m \{ 0,64m^2 [1,571] + (0) \}$$

$$Volumen = 5,63m^3$$

Determinación del Volumen final



$$Volumen = L \left\{ r^2 \left[\arccos \left(1 - \frac{h_f}{r} \right) \right] + (h_f - r) \sqrt{h_f(2r - h_f)} \right\}$$

$$Volumen = 5,60m \left\{ (0,8)^2 m^2 \left[\arccos \left(1 - \frac{0,7m}{0,8m} \right) \right] + (0,7 - 0,8)m \sqrt{0,7m(2(0,8m) - 0,7m)} \right\}$$

$$Volumen = 5,60m \left\{ 0,64m^2 [\arccos(0,125)] + (-0,1)m \sqrt{0,63m^2} \right\}$$

$$Volumen = 5,60m \{ 0,64m^2 [1,445] + (-0,1)m(0,79m) \}$$

$$Volumen = 5,60m \{ 0,92m^2 - (0,079m^2) \}$$

$$Volumen = 5,60m \{ 0,841m^2 \}$$

$$Volumen = 4,71m^3$$

Entonces el valor del volumen del combustible consumido en un día será la diferencia entre el volumen inicial y el volumen final:

$$Volumen\ combustible\ por\ día = (5,63 - 4,71)m^3$$

$$Volumen\ combustible\ por\ día = 0,92m^3$$

$$Volumen\ combustible\ por\ día = 0,92m^3 \times \frac{1000L}{1m^3} \times \frac{1gal}{3,785L} = 243,06\ gal$$

• Cálculo del flujo másico del aceite lubricante usado

A partir de la densidad API obtenida de la caracterización del aceite quemado, determinamos la densidad o gravedad específica de éste derivado de petróleo:

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\rho\left(\frac{g}{cm^3}\right)} - 131,5 \quad \text{Ec. N}^{\circ} 6$$

$$^{\circ}API + 131,5 = \frac{141,5}{\rho\left(\frac{g}{cm^3}\right)}$$

$$\rho = \frac{141,5}{(^{\circ}API + 131,5)}$$

$$\rho = \frac{141,5}{(27,2 + 131,5)}$$

$$\rho = 0,8916 \frac{g}{cm^3}$$

Partimos del volumen de combustible consumido durante un día de producción

$$0,92 \frac{m^3}{día} \times \frac{1 día}{24 h} = 0,038 \frac{m^3}{h}$$

$$\dot{m} = 0,038 \frac{m^3}{h} \times 0,8916 \frac{g}{cm^3} \times \frac{1000L}{1m^3} \times \frac{1000cm^3}{1L} \times \frac{1Kg}{1000g}$$

$$\dot{m} = 34,178 \frac{Kg}{h}$$

Entonces el valor calórico aportado por el combustible será mediante la referencia del poder calorífico neto de dicho combustible:

$$\dot{Q}_{combustible} = 9651 \frac{Kcal}{Kg} \times 34,178 \frac{Kg}{h}$$

$$\dot{Q}_{combustible} = 329851,88 \frac{Kcal}{h}$$

El valor de flujo de calor anterior sería el aportado diariamente de acuerdo al volumen de combustible empleado, sin embargo sería conveniente determinar el calor suministrado por cada Kg de cal viva, conociendo que el flujo de producción es $159,53 \frac{kg CaO}{h}$, entonces:

$$Q_{suministrado para producción} = \frac{329851,88 \frac{Kcal}{h}}{159,53 \frac{kg CaO}{h}}$$

$$Q \text{ suministrado para producción} = 2067,65 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg CaO}}$$

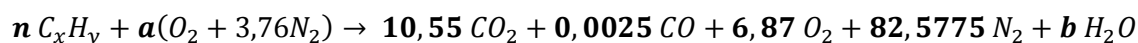
3.1.1.3 DETERMINACIÓN DEL EXCESO DE AIRE IMPLICADO EN LA REACCIÓN DE COMBUSTIÓN

Para los cálculos siguientes se empleó los datos de campo del análisis volumétrico de los gases de combustión:

Gas de Combustión	Resultado de la medición	Resultado (%)
Oxígeno	6,87 %	6,87
CO ₂	10,55 %	10,55
CO	25 ppm	0,0025
NO	6 ppm	0,0006
NO ₂	1,5 ppm	0,00015
NO _x	7 ppm	0,0007
SO ₂	0 ppm	0

Entonces de acuerdo a lo anterior, en vista de que la sumatoria del porcentaje de los compuestos de nitrógeno es un valor mínimo, asumimos que corresponde a 0% y que por lo tanto la diferencia porcentual corresponderá al N₂:

Gas de Combustión	Resultado (%)
O ₂	6,87
CO ₂	10,55
CO	0,0025
N ₂	82,5775



Balance de masa para cada elemento:

$$N_2: \quad a \cdot 3,76 = 82,5775$$

$$C: \quad n \cdot x = 10,55 + 0,0025$$

$$H: \quad n \cdot y = 2b$$

$$O_2: \quad a = 10,55 + \frac{0,0025}{2} + 6,87 + \frac{b}{2}$$

$$\begin{array}{ll} N_2: & a \cdot 3,76 = 82,5775 \\ a = & \frac{82,5775}{3,76} \\ a = & 21,9621 \end{array} \quad \begin{array}{ll} O_2: & a = 10,55 + \frac{0,0025}{2} + 6,87 + \frac{b}{2} \\ 21,9621 = & 10,55 + 0,00125 + 6,87 + \frac{b}{2} \\ 21,9621 = & 17,42125 + \frac{b}{2} \\ 4,54085 = & \frac{b}{2} \\ b = & 9,0817 \end{array}$$

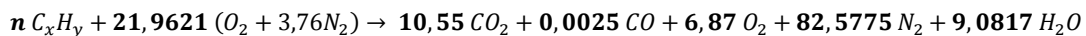
Dividiendo la ecuación para el C con la del H, se puede obtener la relación de composición del combustible (x/y):

$$\left. \begin{array}{l} C: \quad n \cdot x = 10,55 + 0,0025 \\ H: \quad n \cdot y = 2b \end{array} \right\} \quad \div$$

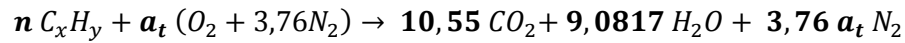
$$\frac{x}{y} = \frac{10,5525}{18,1634}$$

$$\frac{x}{y} = 0,5809$$

Entonces la ecuación de combustión real será:



Ahora para determinar el porcentaje de aire teórico es necesario conocer la cantidad de aire teórico mediante la ecuación de combustión teórica del combustible:



$$O_2: \quad a_t = 10,55 + \frac{9,0817}{2}$$

$$a_t = 15,0909$$

Por lo tanto el % de aire teórico estará determinado de la siguiente manera:

$$\% \text{ Aire Teórico} = \frac{m_{aire \text{ real}}}{m_{aire \text{ teórico}}} = \frac{N_{aire \text{ real}}}{N_{aire \text{ teórico}}} \quad \text{Ec. N}^\circ 7$$

Donde

m: Masa de la sustancia

N: número de moles

$$\% \text{ Aire Teórico} = \frac{N_{aire \text{ real}}}{N_{aire \text{ teórico}}} \times 100$$

$$\% \text{ Aire Teórico} = \frac{21,9621 (4,76) kmol}{15,0909 (4,76) kmol} \times 100$$

$$\% \text{ Aire Teórico} = 145,53$$

Por lo tanto el porcentaje de exceso de aire empleado durante este proceso de combustión es:

$$\text{Exceso de aire} = 45,53 \%$$

- **Cálculo de la Relación aire combustible**

Como no contamos con la formula molecular del aceite quemado determinamos la masa del combustible tomando los datos reales del volumen de combustible empleado durante un día y mediante la formula de densidad obtenemos el valor requerido.

$$\rho = 0,8916 \frac{g}{cm^3}$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$m = \rho \times V$$

$$m = 0,8916 \frac{g}{cm^3} \times \frac{1Kg}{1000g} \times 0,92 m^3 \times \frac{(100)^3 cm^3}{1m^3}$$

$$m = 820,27Kg$$

Entonces la relación aire-combustible será:

$$AC = \frac{masa_{aire}}{masa_{combustible}}$$

$$AC = \frac{21,9621 (4,76) kmol Aire \times \frac{29Kg Aire}{kmol Aire}}{820,27Kg de Combustible}$$

$$AC = 3,696 \frac{Kg Aire}{Kg Combustible}$$

Lo que indica que durante la producción de un día se consume 3,696 Kg de aire por cada Kg de aceite quemado suministrado.

- **Cálculo del flujo de calor aportado por el aire**

Y ahora se puede determinar el flujo másico de aire:

$$\dot{m}_{aire\ suministrado} = AC \times \dot{m}_{combustible} \quad \text{Ec. N° 8}$$

$$\dot{m}_{aire\ suministrado} = 3,696 \frac{Kg Aire}{Kg Combustible} \times 34,178 \frac{Kg Combustible}{h}$$

$$\dot{m}_{aire\ suministrado} = 126,322 \frac{Kg Aire}{h}$$

Lo que servirá para determinar el flujo de calor aportado por el aire:

$$\dot{Q}_{aire} = \dot{m}_{aire} C_p (T_f - T_a) \quad \text{Ec. N° 9}$$

Donde:

\dot{Q}_{aire} = Flujo de calor suministrado de acuerdo a la catidad de combustible inflamado durante un día.

\dot{m}_{aire} = Flujo másico de aire

C_p = Poder calorífico del aire

T_f = Temperatura en el interior del horno 1000°C

T_a = Temperatura Ambiente 27°C

$$\dot{Q}_{aire} = 126,322 \frac{Kg}{h} \times 1,005 \frac{KJ}{Kg \text{ } ^\circ K} (1273 - 300)^\circ K$$

$$\dot{Q}_{aire} = 123525,86 \frac{KJ}{h} \times \frac{1Kcal}{4,18KJ}$$

$$\dot{Q}_{aire} = 29551,64 \frac{Kcal}{h}$$

3.1.1.4 Determinación de las pérdidas de calor

- Cálculo del calor generado por los gases de combustión

$$Q = \sum N_p (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p - \sum N_r (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_r \quad \text{Ec. N}^\circ 10$$

Q = Calor de transferencia

N_p = Número de moles de los productos

N_r = Número de moles de los reactivos

\bar{h}_f° = Entalpía de formación en el estado de referencia.

$\bar{h}_{333^\circ K}$ = Entalpía del gas a la temperatura de entrada del combustible (60°C)

$\bar{h}_{1273^\circ K}$ = Entalpía del gas a la temperatura de combustión del combustible en el horno (1000°C)

Sustancia	\bar{h}_f°	$\bar{h}_{333^\circ K}$	$\bar{h}_{1273^\circ K}$
O ₂	0	9456,8	41060,7
N ₂	0	9684,3	39249,65
H ₂ O _(g)	-241820	11077,4	47600,5
CO ₂	-393520	10686,7	57983,05
CO	-110530	9684,6	39602,5

Fuente: CENGEL YUNUS A., Termodinámica Tomo II.

$$Q_{gases\ producidos} = \sum N_p(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p$$

$$Q_{gases\ producidos} = 10,55 \text{KmolCO}_2(-393520 + 57983,05 - 10686,7) \frac{KJ}{\text{KmolCO}_2} + 0,0025 \text{KmolCO}(-110530 + 39602,5 - 9684,6) \frac{KJ}{\text{KmolCO}} + 9,0817 \text{KmolH}_2\text{O}(-241820 + 47600,5 - 11077,4) \frac{KJ}{\text{KmolH}_2\text{O}} + 6,87 \text{KmolO}_2(0 + 41060,7 - 9456,8) \frac{KJ}{\text{KmolO}_2} + 82,5775 \text{KmolN}_2(0 + 39249,65 - 9684,3) \frac{KJ}{\text{KmolN}_2}$$

$$Q_{gases\ producidos} = 10,55 \text{KmolCO}_2(-346223,65) \frac{KJ}{\text{KmolCO}_2} + 0,0025 \text{KmolCO}(-80612,1) \frac{KJ}{\text{KmolCO}} + 9,0817 \text{KmolH}_2\text{O} \times (-205296,9) \frac{KJ}{\text{KmolH}_2\text{O}} + 6,87 \text{KmolO}_2(31603,9) \frac{KJ}{\text{KmolO}_2} + 82,5775 \text{KmolN}_2(29565,35) \frac{KJ}{\text{KmolN}_2}$$

$$Q_{gases\ producidos} = -3652659,508 \text{ KJ} - 201,530 \text{ KJ} - 1864444,857 \text{ KJ} + 217118,793 \text{ KJ} + 2441432,69 \text{ KJ}$$

$$Q_{gases\ producidos} = (-5517305,895 + 2658551,483) \text{ KJ}$$

$$Q_{gases\ producidos} = -2858754,412 \text{ KJ}$$

- **Determinación del calor perdido en la eliminación de gases de combustión por Kg de combustible**

$$Q_{gases\ producidos} = \frac{-2858754,412 \text{ KJ}}{820,27 \text{ Kg Combustible}}$$

$$Q_{gases\ producidos} = -3485,14 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg Combustible}}$$

Entonces el flujo de calor perdido por los gases de combustión será:

$$\dot{Q}_{gases\ producidos} = \dot{m} Q \quad \text{Ec. N}^\circ 11$$

$$\dot{Q}_{gases\ producidos} = 34,178 \frac{\text{Kg Combustible}}{h} \times -3485,14 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg Combustible}}$$

$$\dot{Q}_{gases\ producidos} = -119115,06 \frac{\text{KJ}}{h} \times \frac{1 \text{ Kcal}}{4,18 \text{ KJ}}$$

$$\dot{Q}_{gases\ producidos} = -28496,43 \frac{Kcal}{h}$$

Una vez determinado el flujo de calor aportado por el combustible para el proceso de calcinación ($\dot{Q}_{combustible}$), el flujo de calor correspondiente al aire necesario para la inflamación del combustible, y el flujo de calor requerido para que se dé la disociación de la caliza ($\dot{Q}_{útil}$), se procede a calcular otras pérdidas de calor durante el proceso de combustión.

$$\dot{Q}_{otras\ pérdidas} = (\dot{Q}_{combustible} + \dot{Q}_{aire}) - (\dot{Q}_{útil} + \dot{Q}_{gases\ producidos}) \quad \text{Ec. N° 12}$$

$$\dot{Q}_{otras\ pérdidas} = [(329851,88 + 29551,64) - (124621,65 + 28496,43)] \frac{Kcal}{h}$$

$$\dot{Q}_{otras\ pérdidas} = 206285,44 \frac{Kcal}{h}$$

3.1.1.5 Cálculo de la eficiencia del actual proceso de Combustión

$$\eta = \frac{Q_{entra} - Q_{sale}}{Q_{entra}} \times 100 \quad \text{Ec. N° 13}$$

Donde:

η : Eficiencia de la combustión (%)

\dot{Q}_{entra} : Es el flujo de calor aportado para el proceso de calcinación tanto del aire como del combustible $\left(\frac{Kcal}{h}\right)$

\dot{Q}_{sale} : Es el calor perdido y que corresponde a los flujos de calor que abandonan la cámara de combustión correspondiente a los gases de combustión y a otras pérdidas. $\left(\frac{Kcal}{h}\right)$

$$\eta = \frac{(\dot{Q}_{combustible} + \dot{Q}_{aire}) - (\dot{Q}_{gases\ producidos} + \dot{Q}_{otras\ pérdidas})}{(\dot{Q}_{combustible} + \dot{Q}_{aire})} \times 100$$

$$\eta = \frac{[(329851,88 + 29551,64) - (28496,43 + 206285,44)] \frac{Kcal}{h}}{(329851,88 + 29551,64) \frac{Kcal}{h}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{359403,52 - 234781,87 \frac{Kcal}{h}}{359403,52 \frac{Kcal}{h}} \times 100\%$$

$$\eta = \mathbf{34,67\%}$$

3.1.1.6 Cálculo de la eficiencia del proceso de Combustión mejorado

En vista de que la eficiencia del actual proceso de combustión se ve afectado por el elevado valor del flujo correspondiente a otras pérdidas se resuelve asumiendo teóricamente que éste valor corresponderá entre 10-14% del dato de sumatoria del flujo de calor que entra al sistema.

$$\eta = \frac{Q_{entra} - Q_{sale}}{Q_{entra}} \times 100$$

$$\eta = \frac{(\dot{Q}_{combustible} + \dot{Q}_{aire}) - (\dot{Q}_{gases\ producidos} + \dot{Q}_{otras\ pérdidas})}{(\dot{Q}_{combustible} + \dot{Q}_{aire})} \times 100$$

$$\eta = \frac{[(329851,88 + 29551,64) - (28496,43 + 48000)] \frac{Kcal}{h}}{(329851,88 + 29551,64) \frac{Kcal}{h}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{359403,52 - 234781,87 \frac{Kcal}{h}}{359403,52 \frac{Kcal}{h}} \times 100\%$$

$$\eta = \mathbf{78,44\%}$$

3.2 RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS

De los cálculos aplicados se obtuvieron los siguientes resultados de importancia para el análisis del sistema actual de combustión en el tratamiento de la caliza para la obtención de cal viva.

Tabla N° 24 Resultados de Cálculos de Ingeniería

Determinación	Resultado
Flujo de alimentación de piedra caliza	$340,14 \frac{Kg\ Ca\ CO_3}{h}$
Flujo de caliza (83,75% $CaCO_3$) que reacciona	$284,87 \frac{Kg\ Ca\ CO_3}{h}$
Flujo de Cal Viva obtenido	$159,53 \frac{kg\ CaO}{h}$
Flujo de CO_2 desprendido de la disociación de caliza	$125,34 \frac{kg\ CO_2}{h}$
Capacidad de Producción de CaO diaria	3828,04 kg CaO
Calor mínimo necesario para la disociación de $CaCO_3$	$781,18 \frac{Kcal}{KgCaO}$
Flujo de calor útil para la disociación de caliza en función del flujo de producción de CaO	$124621,65 \frac{Kcal}{h}$
Volumen de combustible consumido por día	243,06 gal
Flujo másico de combustible alimentado al quemador	$34,178 \frac{Kg}{h}$
Flujo de calor aportado por el combustible	$329851,88 \frac{Kcal}{h}$
Calor suministrado por el combustible en función del flujo de producción de CaO	$2067,65 \frac{Kcal}{kg\ CaO}$
Exceso de aire	45,53 %
Relación aire-combustible	$3,696 \frac{Kg\ Aire}{Kg\ Combustible}$
Flujo másico de aire suministrado	$126,322 \frac{Kg\ Aire}{h}$

Flujo de calor aportado por el aire	$29551,64 \frac{Kcal}{h}$
Flujo de calor de gases de combustión	$-28496,43 \frac{Kcal}{h}$
Flujo de calor debido a otras pérdidas	$206285,44 \frac{Kcal}{h}$
Eficiencia del proceso de combustión	34,67%
Eficiencia esperada con la optimización del proceso de combustión	78,44%

Fuente: Autor

3.3 PROPUESTA

Después de haber realizado los estudios antes mencionados y de la identificación de los factores que afectan a este proceso así como también los efectos provocados, se determinó que el flujo de calor útil para la disociación de la caliza en función del flujo de Producción de CaO es de $124621,65 \frac{Kcal}{h}$ y el flujo de calor aportado por el combustible es de $329851,88 \frac{Kcal}{h}$, se estableció la diferencia entre estos valores dando como resultado $205230,23 \frac{Kcal}{h}$, lo que representa que existe un excedente de calor que se pierde en el proceso de combustión para el tratamiento de piedra caliza.

Por otro lado, mediante la comparación de los flujos de calor suministrados y que abandonan la cámara de combustión se determinó que en términos porcentuales representan $\dot{Q}_{combustible} = 91,78\%$, $\dot{Q}_{aire} = 8,22\%$ de igual forma $\dot{Q}_{gases\ producidos} = 7,93\%$, $\dot{Q}_{otras\ pérdidas} = 58,12\%$, y que el calor aprovechado en el proceso de calcinación corresponde a tan solo el **34,67%**.

Por esta razón se ha buscado el planteamiento de una propuesta de acción que deberá ser tomada en cuenta para el desarrollo de la optimización del actual proceso de combustión y que beneficiará de forma recíproca en los intereses de operación de la Corporación los Nevados.

Es así que la propuesta se fundamenta en los resultados del diagnóstico de la situación actual del proceso de combustión y de los cálculos de ingeniería de la producción.

Para lograr la optimización del proceso de combustión se requiere incluir alternativas de solución que ayudarían a mejorar el actual proceso de quema, enfocadas a las áreas, ambiental, operacional, calidad del producto y eficiencia del proceso de combustión, aportando en el mejoramiento de cada una de ellas. *Ver figura N° 7*

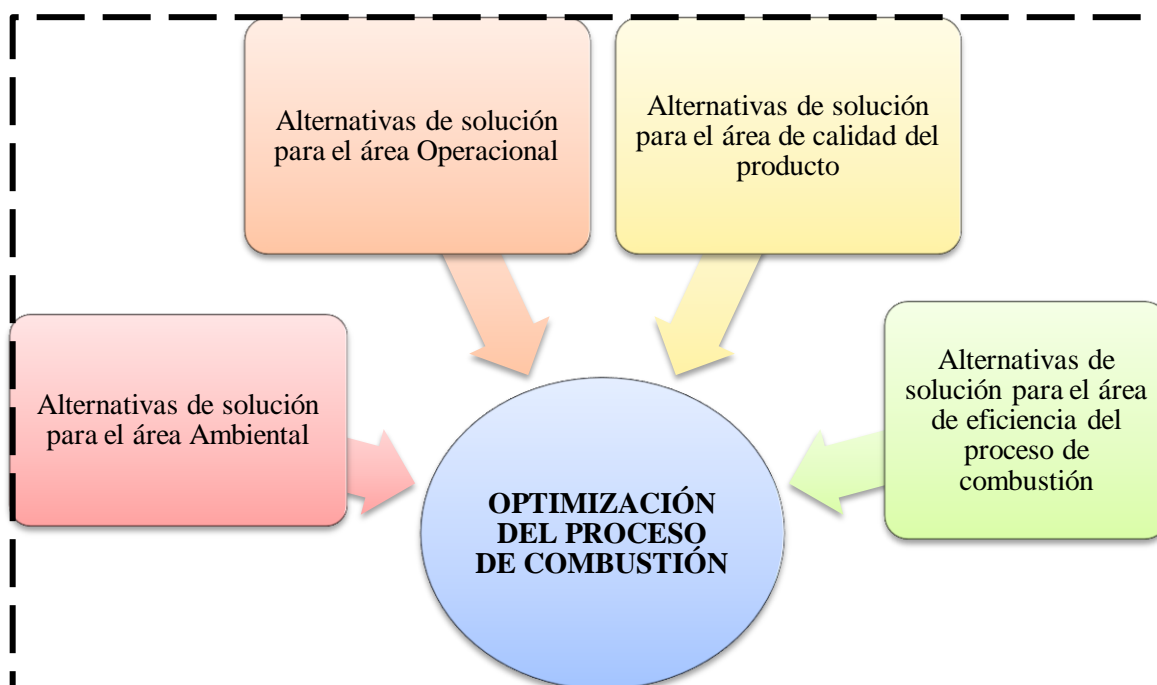


Figura N° 7 Esquematización de la propuesta para la optimización del actual proceso de combustión

A continuación en la siguiente tabla se describe cada una de las alternativas de solución que involucra la optimización del proceso de combustión.

Tabla N° 25 Descripción de las alternativas de solución para cada área que involucra la optimización del proceso de combustión

Área beneficiada	Alternativa de solución	Descripción del alcance
Ambiental	Recirculación de gases de combustión	Recupera parte de los hidrocarburos no quemados en el anterior ciclo de combustión, reduciendo así el costo de combustible y optimizando la eficiencia energética del sistema de combustión.
	Adecuación de ciclón a la salida de gases de combustión del horno.	Ayudará a disminuir el material particulado emitido a la atmósfera así como también la retención de algunos metales pesados.
	Monitoreo de control de gases de combustión.	Se realizará de forma semestral para evaluar el impacto a la atmósfera y tomar medidas preventivas.
Operacional	Implementación de una trituradora para la reducción de tamaño de la piedra caliza	Realizará el proceso de trituración de forma eficiente disminuyendo así el tiempo requerido para una operación manual. Además de que mejoraría la homogeneidad del tamaño de la materia prima
	Implementación de un sistema de pesaje en la entrada de alimentación de piedra caliza al horno y en la descarga de cal viva	Contribuirá al control de la producción y registro cuantitativo tanto de la materia prima como del producto obtenido.
	Adecuación del punto de alimentación de la carga mediante una tolva.	Distribuirá de forma ordenada la carga de piedra caliza al horno. Se reubicará el punto de alimentación al lado lateral de la zona de precalentamiento y en la parte superior se establecerá la chimenea.
	Ubicación de sensores :	

	<ul style="list-style-type: none"> • Termocupla de rango max. 1300°C situado de forma adecuada en la zona de calcinación. • Termocupla de rango inferior ubicada en la zona de precalentamiento del horno. • Sensor de nivel capacitativo ubicado debajo del punto de carga. • Sensor de presión a la entrada del combustible al quemador • Medidor de flujo de aire • Medidor de flujo de combustible 	<p>Mejorará el control de la temperatura de calcinación.</p> <p>Controlar el flujo de aire suministrado</p> <p>Regulará el control del nivel máximo de piedra caliza cargado al horno.</p> <p>Controla la presión de alimentación del combustible.</p> <p>Determinará el flujo de aire que entra al quemador</p> <p>Controlará el caudal de combustible alimentado al quemador.</p>
Calidad del producto	Disminución del tamaño de piedra caliza (5-10cm)	Para evitar material crudo y mejor penetración del calor en la piedra.
	Obtención de caliza con un contenido de CaCO_3 >95%	Para obtener un mejor rendimiento de reacción durante la calcinación, y producir una cal viva de calidad.
Eficiencia del proceso de combustión	Identificar la fugas de calor en la construcción del horno y remediarlas.	Esto disminuirá el porcentaje de pérdidas de calor especialmente en las paredes del horno y en un futuro se recomendaría colocar un aislamiento metálico alrededor del horno.

	Pretratamiento del combustible: <ul style="list-style-type: none"> Centrifugación Filtración 	Facilitará la separación del agua libre y con la aplicación de demulsificante se disminuirá en gran parte el agua emulsionada. Evitará el paso de sedimentos y sustancias extrañas.
	Combinación del aceite quemado con bunker o sustitución total.	Evitará el problema de contaminación por la presencia de metales pesados presentes en el aceite quemado.

Fuente: Autor

Con estas alternativas de solución propuesta se pretenderá reducir lo siguiente:

- El consumo diario de combustible en un 15-20%, suministrado para el proceso de calcinación.
- El exceso de aire del valor actual que es cercano al 50% en un 10% a 15% para que el flujo de aire introducido en el quemador no esté en exceso con respecto al flujo de combustible que vaya a ser inflamado y de esta forma evitar que se suministre más combustible para alcanzar la temperatura óptima de la zona calcinación que no deberá sobrepasar los 1250°C.
- La emisión de material particulado y metales pesados en los gases de combustión.
- El contenido de material crudo en el producto, cal viva, por la disociación incompleta del carbonato de calcio.
- El tiempo de producción en razón que se implementarán adecuados equipos y sensores de medición que facilitarán la operación.

Con las alternativas propuestas se pretendería aumentar el rendimiento productivo de la cal en un 40% por lote de sacos diario.

Por lo tanto la presente propuesta de optimización es la mejora evolutiva del actual proceso de combustión implicando la implementación de materiales e instrumentos mas

sofisticados necesarios para obtener un proceso tecnificado que permita el eficaz monitoreo de las etapas de operación y la obtención de un producto con mayores características competitivas en el mercado.

3.4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se compararán y analizarán los resultados obtenidos de cada uno de los factores investigados presentados en la parte experimental y también de los obtenidos mediante los cálculos de ingeniería, así tenemos:

En cuanto a los resultados de las características de calidad del producto obtenido de la calcinación, cal viva, en relación a la piedra caliza de mayor empleo, Ganquis, reportado en la tabla N° 10, se constata que la materia prima, posee una pureza inferior al 95% de CaCO_3 , generando un producto con un contenido de impurezas (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) mayor al 5%, óxido de calcio menor al 75% y dióxido de carbono mayor al 3%, es decir no cumple con la norma NTE INEN 248 - Cal viva para propósitos estructurales (*Ver Anexo A*). Resultados que se evidencian en las características visuales de la cal viva obtenida, además se interpreta de acuerdo al resultado por pérdidas de calcinación de éste, correspondiente al 13,20%, que el sistema de combustión para la calcinación no es eficiente en razón de que se evidencia material crudo o presencia de CaCO_3 por recarbonatación, afectando la reactividad de la cal viva obtenida. Y finalmente mediante la determinación del tamaño de partícula expuesto en la tabla N°11, se observa que existe variación y desigualdad en cuanto a la finura del material, causado por la presencia de partículas correspondientes a las impurezas o material crudo. Por lo tanto para mejorar la calidad del producto, se deben tomar en cuenta tres aspectos fundamentales el tipo de piedra caliza ($\%\text{CaCO}_3 >95$), el tamaño del mineral alimentado al horno, (10-15cm), y la temperatura en la zona de calincación (máx 1250°C).

Mediante el análisis de las emisiones de los productos de la combustión se apreció dos factores críticos de interés, el tipo de combustión, y los contaminantes de mayor

preocupación, de esta forma en la tabla N° 16, debido a que las cantidades de inquemados (CO y óxidos de nitrógeno) son cercanos al 0%, se puede decir que se esta llevando una combustión completa con un exceso de aire entre el 44 - 48%. Por otro lado, debido a que el aceite quemado contiene la presencia de ciertos metales pesados (Pb, Zn, Ca, P, Si, Na, Fe) y recalando que no tiene un adecuado pretratamiento, algunos de estos persisten durante la combustión y el proceso de calcinación y son emitidos a la atmósfera, siendo los precursores de contaminación ambiental de mayor interés el MP ($>80\text{mg/m}^3$) y el Pb (Ver Tabla 17), por su inconformidad con el valor permisible establecido en el acuerdo 048, para las industrias cementeras. (Ver Anexo D). Por lo que sería factible dar un adecuado pretratamiento al combustible para la remoción del agua y sedimentos y adecuar un sistema de recolección de material particulado efectivo para minimizar el impacto ambiental ya que a pesar de que se establezca un ciclón se controla el Pb, pero el MP aún no está dentro del límite permisible (Ver Tabla N°18).

Ahora analizando los resultados de los cálculos de ingeniería de la tabla N°24, la producción diaria corresponde a aproximadamente 3,8 ton de cal viva a partir de 8,2 ton de piedra caliza ($83,75\% \text{CaCO}_3$), indicando que el primer valor fluctúa de acuerdo a la carga de alimentación de piedra caliza, por lo tanto se expone que el rendimiento de producción actual es de 46,34%, en razón de que se empleó una piedra caliza de pureza menor al 95% de CaCO_3 .

De igual forma en la tabla N° 24, se observa que existe pérdidas de energía, analizando los valores de flujos de calor aportados por el aire $29551,64 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$, y por el combustible $329851,88 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$, en relación al calor aprovechado $124621,65 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$, ya que a menudo no se regula o controla el suministro de combustible, por lo que se genera un exceso de aporte calórico que en este caso correspondió a $234781,87 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$. Indicando además que la mayor parte del calor se pierde debido a las condiciones de diseño y construcción del horno, lo que afecta a la eficiencia del proceso de combustión, por lo que si se mejorara su infraestructura se tendría una eficiencia mayor al 50 %.

El aire suministrado en un 45, 53% de exceso es adecuado pero no el óptimo ya que a pesar de que mantiene la ignición del combustible en ocasiones provocaría la combustión incompleta del mismo y cuando la alimentación del combustible es excesiva por la falta de control de éste, se provoca que la temperatura fluctúe de 1000 a 1500°C, produciendo un producto requemado.

En definitiva a pesar de que la producción de cal viva, no es mecanizada, es buena, y la perspectiva de esta cadena productiva se puede mejorar, mediante la corrección de ciertos factores que no están siendo tomados en cuenta para la oferta de un producto de calidad.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO IV

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

Al término de el desarrollo de este proyecto investigativo y de acuerdo a los objetivos planteados se exponen las siguientes conclusiones.

- El proceso de combustión actual en las plantas de cal que forman parte de la Corporación Los Nevados de la provincia de Chimborazo, se optimizó mediante la propuesta de aplicación de medidas correctivas de operación, que de forma indirecta contribuirá a la mejora ambiental y calidad del producto ofertado, no obstante, se deberá implementar un desarrollo mecanizado del proceso, adecuaciones en el sistema actual para el pretratamiento del combustible, y para la disminución de los gases de combustión.
- La caracterización de la materia prima, piedra caliza de Ganquis, evidenció que se trata de una caliza de pureza menor al 95% de CaCO_3 , factor que disminuye el rendimiento de la producción de cal viva e influye en su calidad, por la presencia de un contenido representativo de impurezas SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , mayor al 5% establecido por la Norma NTE INEN 248, además de constatar la presencia de CaCO_3 , que indica que se dio una recarbonatización, interpretado por el elevado % de los compuestos volátiles como H_2O y CO_2 mayor al 3%, determinado por el análisis de pérdidas por calcinación.
- Los residuos de combustión y agentes contaminantes no resulta un impacto medioambiental significativo, pues los valores registrados se encuentran en el rango de aceptación de límites permisibles establecido en el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundario (TULAS) y en la legislación ambiental

concerniente al Distrito Metropolitano de Quito en cuanto a la actuación ambiental de las empresas que operen con fuentes fijas de combustión, y solo en vista del incumplimiento del MP y Pb con el acuerdo 048 expedido por el Ministerio del Ambiente para la industria cementera de combustión, se deben tomar medidas preventivas y monitoreo regular para la disminución de las emisiones durante el proceso de calcinación.

- Los resultados de los cálculos nos dieron una perspectiva del nivel de operación del proceso para la producción de cal viva, la cual corresponde a un grado medio, con una eficiencia del proceso de combustión del 34,67%, en razón de que no se cuenta con las medidas de control operacionales adecuadas, existiendo pérdidas de tiempo de producción y consumo no regulado de combustible, generando pérdida en cuanto a costos de producción y energéticos.
- La eficiencia del actual proceso de combustión correspondiente al 34,67% se ve afectado debido a las fugas de calor específicamente en el horno que corresponden al 58,12%, por lo que mediante, la implementación de las alternativas de solución del tipo operacional y adecuaciones en el horno, se espera superar el 50%, disminuyendo el consumo de combustible y el exceso de aire.

4.2 RECOMENDACIONES

Para contribuir al desarrollo investigativo de la línea de investigación presentada y de la producción se recomienda:

- Trabajar con una piedra caliza que tenga un porcentaje de pureza > al 95% de CaCO_3 para obtener un producto con mejores características de calidad.
- Caracterizar cal viva producida de diferentes lotes, para establecer un grado de aceptación de la calidad del producto obtenido.

- En caso de seguir utilizando aceite quemado, dar un pretratamiento adecuado, o emplear un recolector de material particulado de mayor eficiencia que un ciclón, por ejemplo un filtro de mangas.
- Realizar un monitoreo semestral de la emisión de los gases de combustión y elementos contaminantes para controlar y minimizar el impacto ambiental.
- Controlar la temperatura de calcinación hasta el valor máximo alcanzado por la inflamación del aceite quemado, para proceder a la descarga, y de esta forma establecer el tiempo óptimo de permanencia de la piedra caliza en la zona de calcinación.
- Llevar un registro del combustible suministrado por día de producción, para establecer el volumen promedio consumido y evitar pérdidas.
- Realizar pruebas en cuanto al suministro de aire y combustible en función de la temperatura de la zona de calcinación hasta 1250°C.
- Implementar un sistema de pesaje de la materia prima y del producto obtenido, para determinar el rendimiento de la producción.
- Mejorar de forma prioritaria el aislamiento térmico del horno con hormigón, y especialmente reforzar la zona de calcinación con ladrillo refractario, para lograr el aumento de la eficiencia del proceso de combustión.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.-** COLOMA G., La Cal: ¡Es un Reactivo Químico!., Santiago de Chile-Chile.,
I.S.B.N., 2008, Pp. 31-76
- 2.-** PERRY R., Manual del Ingeniero Químico., Tomo I, 6a ed., México D.F.-
México., Mc. Graw Hill., 2006 Pp. 3-177,3-180
- 3.-** WYLEN V., Fundamentos de Termodinámica Solucionario., Lima-Perú., San
Marcos E.I.R.L., 2007., Pp. 815-842
- 4.-** REED R., North American Combustion Handbook., 2ª ed., Ohio-USA., North
American Mfg. Co., 1978., Pp. 307-332
- 5.-** CENGEL YUNUS A., Termodinámica., Tomo II., 2a ed., México D.F.- México.,
Mc. Graw Hill., 1996., Pp. 733-751
- 6.-** DUDA W., Cement data-book International Process Engineering., Pennsylvania-
USA., Bauverlag GmbH-Wiesbaden., 1976., Pp. 228 - 263
- 7.-** SPIROPOULOS J., Producción de Cal a Pequeña Escala para Construcción.,
GATE/GTZ., 1985.
- 8.-** NATIONAL LIME ASSOCIATION., Chemical Lime Facts., Bulletin 214.,

4a ed., Washington D.C.- USA., 1976.

- 9.-** ECUADOR., MINISTERIO DEL AMBIENTE., Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria TULAS., Libro VI., Anexo 3., Norma de Emisiones al Aire desde Fuentes Fijas de Combustión.
- 10.-** ECUADOR., MINISTERIO DEL AMBIENTE, Acuerdo N° 048., Norma Técnica para el Coprocesamiento de Desechos Peligrosos en Hornos Cementeros., Libro VI., Anexo 11.
- 11.-** ECUADOR., DIRECCIÓN METROPOLITANA DEL MEDIOAMBIENTE., Ordenanza N° 146., Capítulo III., Norma Técnica para Emisiones a la Atmósfera de Fuentes Fijas de Combustión, Quito-Ecuador., 2005.
- 12.-** ECUADOR., INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN., NTE INEN 248, Cal viva para propósitos estructurales. Requisitos., Quito-Ecuador., 2010., Pp.2
- 13.-** ECUADOR., INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN., NTE INEN 251., Cales. Muestreo., Quito-Ecuador., 1972., Pp. 3
- 14.-** ECUADOR., INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN., NTE INEN 2589., Cal Viva, Cal Hidratada y Caliza. Métodos de Ensayo para el Análisis Físico., Quito-Ecuador., 2011., Pp. 5-11.
- 15.-** MONTOLUISA E. Y TIPÁN H., Diseño de un Horno para la producción de cal viva y cal hidratada de 120 toneladas de producción diaria., Tesis., EPN., Quito-Ecuador, 2008.

Internet

16.- INDUSTRIA DE FABRICACIÓN DE CAL

http://circa.europa.eu/Public/irc/env/ippc_brefs/cement_lime_espdf

2011-11-20

17.- CALES, COMPUESTOS DE CALCIO

<http://www.textoscientificos.com/quimica/cales>

2011-11-20

18.- COMBUSTIÓN

<http://es.wikipedia.org/wiki/Combusti%C3%B3n>

2011-12-02

19.- ACEITES USADOS

<http://www.monografias.com/trabajos17/biodegradacionaceites/aceites.shtml>

2011-12-02

20.- RIESGOS AMBIENTALES DE ACEITES USADOS

<http://www.euskalnet.net/depuroilsa/Riesgosmedioambiente.html>

2011-12-02

ANEXOS

ANEXO A

Composición química de la cal viva

	Cal de calcio	Cal de magnesio
Óxido de Calcio, % min	75	
Óxido de magnesio, % min		20
Óxido de calcio y magnesio, %min	95	95
Sílice, alúmina y óxido de hierro,%máx	5	5
Dióxido de carbono, %máx:		
Si la muestra es tomada en el lugar de fabricación	3	3
Si la muestra es tomada en cualquier otro lugar	10	10

Fuente: NTE INEN 248:2010 - Cal viva para propósitos estructurales

ANEXO B

Límites máximos permisibles de emisiones al aire para fuentes fijas de combustión.

Norma para fuentes en operación a partir de enero de 2003

CONTAMINANTE EMITIDO	COMBUSTIBLE UTILIZADO	VALOR	UNIDADES ^[1]
Partículas Totales	Sólido	150	mg/Nm ³
	Líquido ^[2]	150	mg/Nm ³
	Gaseoso	No Aplicable	No Aplicable
Óxidos de Nitrógeno	Sólido	850	mg/Nm ³
	Líquido ^[2]	550	mg/Nm ³
	Gaseoso	400	mg/Nm ³
Dióxido de Azufre	Sólido	1650	mg/Nm ³
	Líquido ^[2]	1650	mg/Nm ³
	Gaseoso	No Aplicable	No Aplicable

^[1] mg/Nm³: miligramos por metro cúbico de gas, a condiciones normales, de mil trece milibares de presión (1 013 mbar) y temperatura de 0 °C, en base seca y corregidos a 7% de oxígeno.

^[2] combustibles líquidos comprenden los combustibles fósiles líquidos.

Fuente: TULAS, Libro VI, Anexo 3, Norma de Emisiones al Aire desde Fuentes Fijas de Combustión.

ANEXO C

Límites máximos permisibles para emisiones Gaseosas de incineradores de desechos peligrosos

CONTAMINANTE	UNIDAD	LÍMITE DE EMISIÓN	RESULTADO CORREGIDO AL 7 % O ₂
CO	mg/m ³	80	122,26
HCl	mg/m ³	50	76,4
NO _x	mg/m ³	560	855,68
SO ₂	mg/m ³	100	152,8
Partículas	mg/m ³	50	76,4
Arsénico, Selenio, Cobalto, Níquel, Telurio (1)	mg/m ³	2,0*	3,05
Cadmio y Talio (1)	mg/m ³	0,10*	0,15
Plomo, Antimonio, Cromo Total, Platino, Cobre, Vanadio, Zinc, Estaño, Manganeso, Paladio. (1)	mg/m ³	3,0*	4,58
Mercurio (1)	mg/m ³	0,10	0,15
Dioxinas y Furanos (1)	mg/m ³	10	15,28

Todos los valores están para condiciones estándar (1 atmósfera, base seca 25° C y 11% de O₂).

* Suma total de metales pesados

(1) Estos análisis se realizarán en casos de existir evidencias de daño ambiental y bajo pedido de la Entidad Ambiental de Control.

Fuente: Dirección Metropolitana del Medioambiente

ANEXO D

Niveles máximos permisibles de emisiones a la atmósfera ⁽¹⁾

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN mg/Nm ³	FRECUENCIA DE MEDICIÓN	MÉTODO
HCl	10	Anual	Infrarrojo no dispersivo Analizador continuo; NIOSH 7903; EPA 26 A, 13 B; ** Sensores electroquímicos
NOx	1400	Semestral y continuo	Quimioiluminescencia EPA 7E; EPA 7/7A/7C/7D; Res. Col. 03194/83; + Arsenito de sodio; Apéndice F parte 50*; ** Sensores electroquímicos
NH₃	30	Anual	EPA CTM-027-1998
SO₂	800	Semestral y continuo	Infrarrojo no dispersivo EPA 6C; EPA 6/6A/6B; EPA 8; Res. Col. 19622/85; Apéndice A parte 50*; **Sensores electroquímicos
VOCs	20 ⁽²⁾	Anual y continuo	GC-FID, EPA 25 A-2000
Benceno	5	Anual	NIOSH 1501-2003
Partículas Totales o Material particulado	80	Semestre y continuo	Isocinético
Sb, As, Ni, Mn, Pb, Cr, V, Co, Cu	0,8 ⁽³⁾	Anual	Espectrometría de absorción atómica o equivalente
Cd, Tl	0,08	Anual	
Hg	0,08	Anual	
Dioxinas y Furanos ng TEQ/m³	0,2	Anual	VDI 3499 parte 2 de Alemania, 1948-2/3 de la Comunidad Económica Europea EPA 23, 23 ^a (Muestreo), 8280A y 8290 (Análisis)

(1) Condiciones normales, base seca, corregido al 7% de oxígeno (O₂) en volumen.

(2) Sobre la línea base (Medición con combustible fósil)

(3) Suma total de metales

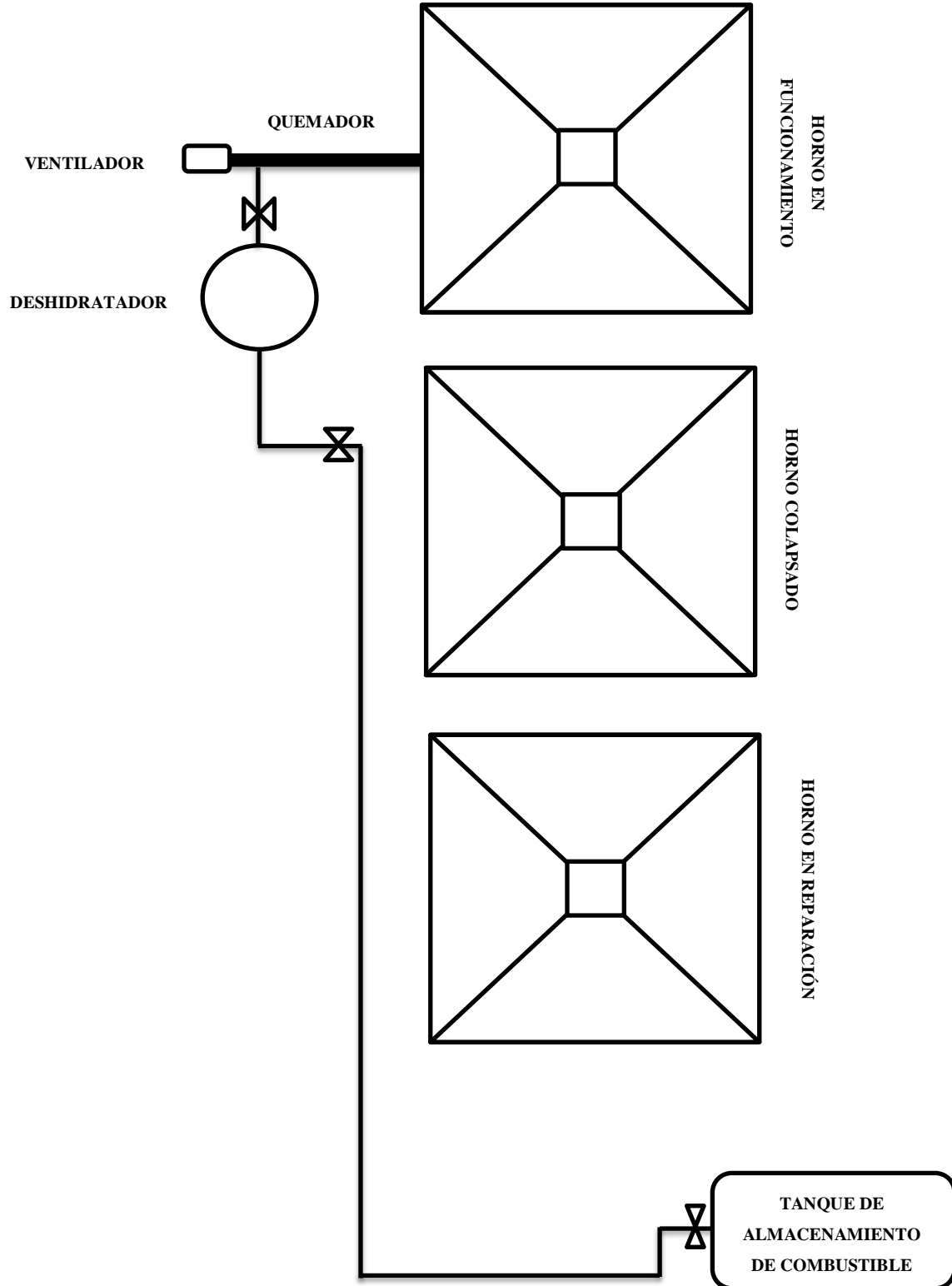
(*) of National Primary and Secondary Ambient Air Quality Standards-USEPA NAAQS

(**) Los instrumentos utilizados en el método de sensores electroquímicos (no métodos equivalente o de referencia) deberán ser calibrados de acuerdo a método EPA establecido.

Fuente: Acuerdo 048-Expedido por el Ministerio del Medio Ambiente- Límites de emisión para empresas cementeras.

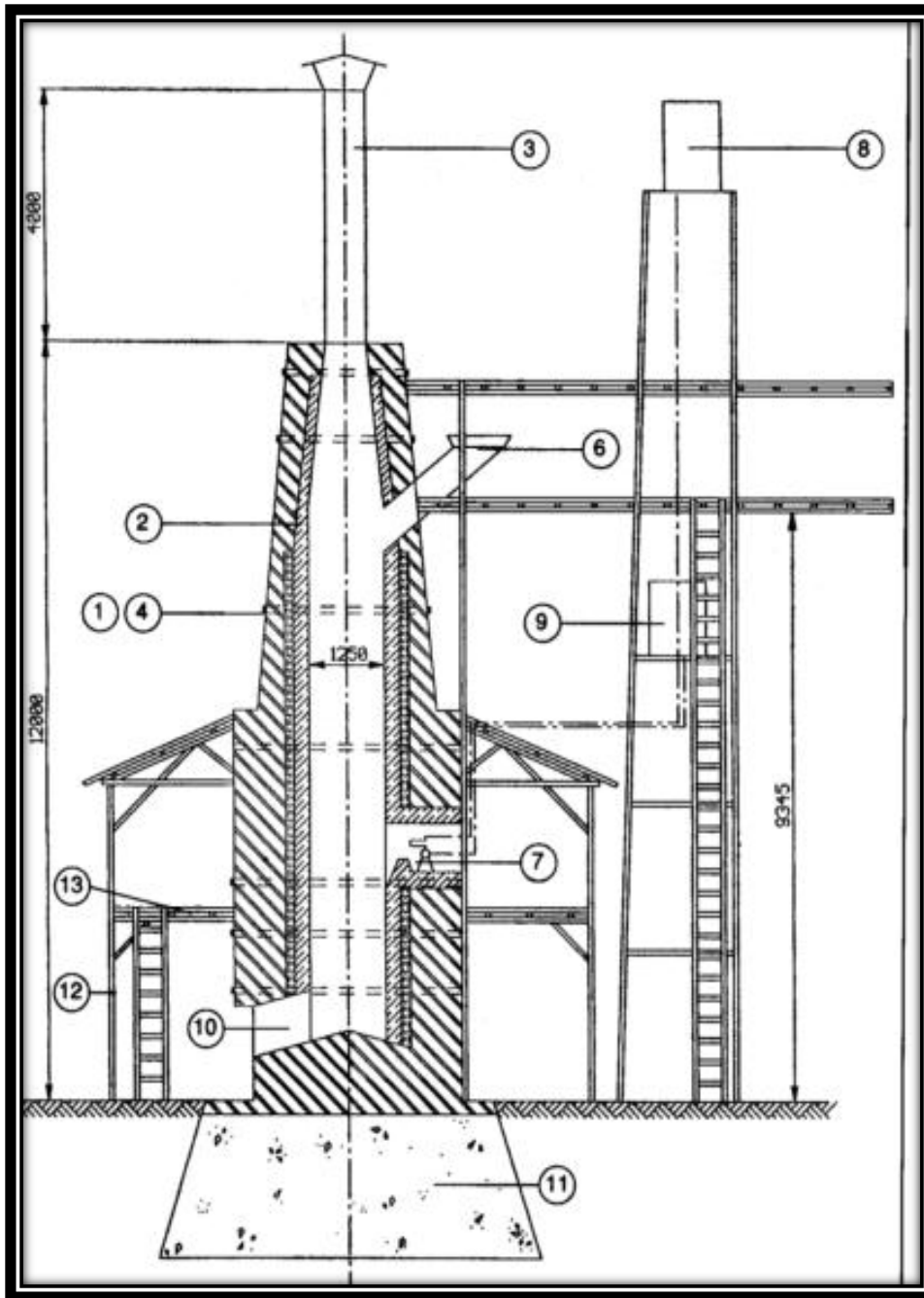
ANEXO E

Vista planta del actual sistema de combustión para la calcinación de la piedra caliza



ANEXO F

Modelo de Diseño de Horno Vertical para la Producción de Cal (6 Ton/día)



Leyenda:

1. Cuerpo del Horno
2. Pared de refractario
3. Chimenea
4. Refuerzo metálico
6. Zona de alimentación
7. Suministro de calor
8. Almacenamiento de combustible
9. Dosificador de combustible
10. Descarga
11. Base de concreto
12. Estructura Metálica
13. Acceso a la zona de calcinación

Fuente: Ficha Técnica de Diseño de Hornos de Cal –Practical Action

Riobamba 13 de febrero de 2012

CERTIFICADO

Por medio del presente me permito certificar que el Srta. González Gaviláñez Lucía Isabela, con Cedula de Identidad N° 171237538-3, Egresada de la Escuela de Ingeniería Química de la facultad de Ciencias de la Escuela Politécnica de Chimborazo realizó los análisis Físico-Químicos en laboratorio de Control de Calidad de Cemento Chimborazo de los siguientes materiales: piedra caliza, cal viva, cal hidratada, productos industriales: empaste y albalux.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, el interesado puede hacer uso del presente certificado como crea conveniente.

Atentamente,



Dra. Margarita Ati

JEFE DE CONTROL DE CALIDAD

CEMENTO CHIMBORAZO CA.

FOTOGRAFÍAS

Planta de Cal- Caleras del Pacífico



Foto N° 1 Rótulo de la planta de cal



Foto N° 2 Recepción de piedra caliza



Foto N° 3 Pilas de piedra caliza



Foto N° 4 Reducción de tamaño de piedra caliza



Foto N° 5 Transporte de piedra caliza al horno



Foto N° 6 Alimentación de piedra caliza

Sistema de Combustión

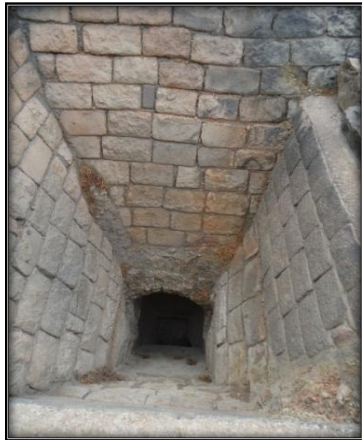


Foto N° 7 Interior de un horno vertical



Foto N° 8 Almacenamiento de combustible



Foto N° 9 Tanque de suministro de combustible



Foto N° 10 Ventilador y quemador



Foto N° 11 Descarga de cal viva



Foto N° 12 Enfriamiento y acopio de piedra calcinada

Parte experimental



Foto N° 13 Muestra de piedra caliza



Foto N° 14 Muestra de cal viva

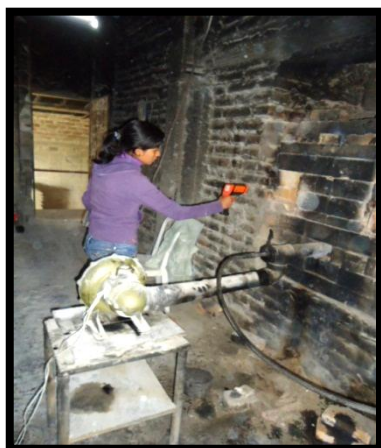


Foto N° 15 Medición de temperatura



Foto N° 16 Termocupla



Foto N° 17 Trituradora mandíbula MSI



Foto N° 18 Pulverizador BICO



Foto N° 19 Plato Caliente Thermo Scientific Type 2200



Foto N° 20 Prensa HERZOG



Foto N° 21 Espectrómetro de rayos X



Foto N° 22 Titulación para determinar CaCO_3 totales



Foto N° 23 Determinación de Sílice



Foto N° 24 Análisis Complexométrico



Foto N° 25 Equipo de tamizado



Foto N° 26 Determinación de densidad

Análisis de Gases



Foto N° 27 Medición de gases en la chimenea



Foto N° 28 Medición de gases en el ciclón



Foto N° 29 Tren isocinético



Foto N° 30 Analizador de gases